

# Naturnaher Uferschutz mit Lenkbuhnen

- Grundlagen, Analytik und Bemessung -

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von  
Matthias Mende  
geboren am 30. Mai 1974  
aus Beelen

Eingereicht am: 24. Januar 2014

Disputation am: 16. April 2014

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. A. Dittrich  
Prof. a.D. Dr. sc. techn. I. Storchenegger

(2014)



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Verzeichnis der Symbole .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Ziel der Arbeit .....	2
<b>2 Sekundärströmungen .....</b>	<b>4</b>
2.1 Definitionen .....	4
2.2 Sekundärströmungen in Flusskurven .....	7
2.2.1 Ursache .....	7
2.2.2 Wirkung .....	8
2.3 Analytik der Sekundärströmungen in Krümmungen .....	12
2.3.1 Sekundärströmung entlang einer Bahnlinie .....	13
2.3.2 Querneigung des Wasserspiegels .....	14
2.3.3 Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche .....	14
<b>3 Sekundärströmungsinduzierende Uferschutzbauweisen .....</b>	<b>17</b>
3.1 Definitionen und Wirkungsweise .....	17
3.1.1 Leitelement .....	17
3.1.2 Lenkbuhne .....	17
3.2 Typische Anordnung und Geometrie .....	18
3.2.1 Leitelemente .....	18
3.2.2 Lenkbuhnen .....	19
3.3 Historie .....	21
3.4 Entstehung der induzierten Sekundärströmung .....	24
3.5 Konstruktive Gestaltung .....	27
3.5.1 Lenkbuhnen .....	27
3.5.2 Leitelemente .....	29
3.6 Anwendungsgebiete .....	31
3.6.1 Allgemeines .....	31
3.6.2 Uferschutz an Prallufern .....	32
3.6.3 Uferschutz und Strukturaufwertung in geraden Gewässerstrecken .....	35

3.7	Unterschiede zwischen Lenkbuhnen und Regelungs- bzw. Uferschutzbuhnen .....	36
3.7.1	Bauwerkshöhe .....	37
3.7.2	Hydraulik .....	38
3.8	Beurteilung der Bauweisen .....	39
3.8.1	Ästhetik / Landschaftsbild .....	39
3.8.2	Ökologie .....	40
3.8.3	Einbau .....	41
3.8.4	Hydraulische Belastbarkeit .....	41
3.8.5	Baukosten .....	41
3.8.6	Verletzungsgefahr .....	41
3.8.7	Fazit .....	41
<b>4</b>	<b>Überprüfung der Übertragbarkeit der Leitelementtheorie auf Lenkbuhnen .....</b>	<b>43</b>
4.1	Lineare Tragflächentheorie als Grundlage für die Leitelementtheorie .....	43
4.2	Leitelementtheorie des IIHR .....	44
4.3	Kritik an der Leitelementtheorie .....	47
4.4	Berechnungsbeispiele: Anwendung von Formeln des IIHR bei Lenkbuhnen .....	51
4.4.1	Berechnung der Quergeschwindigkeitsverteilung über die Tiefe .....	53
4.4.2	Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung über die Tiefe .....	54
4.5	Nichtlineare Tragflächentheorie .....	55
4.6	Fazit .....	57
<b>5</b>	<b>Laboruntersuchungen .....</b>	<b>58</b>
5.1	Versuchsaufbau .....	58
5.1.1	Versuchsrinne .....	58
5.1.2	Variierte Parameter .....	60
5.1.3	Messungen .....	63
5.2	Versuchsdurchführung .....	67
5.2.1	Vorversuche ohne Lenkbuhnen .....	67
5.2.2	Hauptversuche .....	68
5.2.3	Versuche mit Sediment .....	68
5.3	ADV-Filterkriterien .....	68



<b>6</b>	<b>Versuchsergebnisse .....</b>	<b>69</b>
6.1	Wirkungsmechanismus.....	69
6.1.1	Strömungsbild .....	69
6.1.2	Morphologie .....	76
6.1.3	Vergleich mit Naturbeobachtungen .....	77
6.2	Einfluss dimensionsloser Parameter .....	79
6.2.1	Quergeschwindigkeit .....	79
6.2.2	Geschwindigkeitsverteilung .....	84
6.2.3	Einfluss auf die Wassertiefe .....	90
6.2.4	Fazit .....	94
<b>7</b>	<b>Bemessungsregeln .....</b>	<b>95</b>
7.1	Grundsätze .....	95
7.1.1	Höhe .....	95
7.1.2	Länge .....	97
7.1.3	Abstand.....	100
7.1.4	Inklimationswinkel.....	101
7.2	Bauwerksstabilität.....	101
7.2.1	Steingrößen .....	101
7.2.2	Kolkschutz .....	104
7.2.3	Uferanbindung .....	104
7.3	Gerade Gewässerabschnitte .....	105
7.4	Prallufer .....	108
7.4.1	Zielsetzung und grundsätzliche Überlegungen.....	108
7.4.2	Bemessung .....	110
7.4.3	Bemessungsbeispiel .....	111
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>118</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>124</b>

## VERZEICHNIS DER SYMBOLE

$a_x$	=	Abstand zweier Bauwerke (z.B. Leitelement, Lenkbuhnen) in Fließrichtung; Ausdehnung von $v$ in Fließrichtung [m]
$a_y$	=	lateraler Abstand zweier Leitelemente [m]
$a_{y,u}$	=	lateraler Abstand der Leitelemente zum Ufer [m]
$a_z$	=	vertikal zur Hauptströmung verlaufende Ausdehnung von $v$ [m]
$A$	=	Sohlenfläche des betrachteten Flussabschnitts [m <sup>2</sup> ]
$A_B$	=	relativer Abstand [ - ]
$A_D$	=	angeströmte Fläche je Flächeneinheit [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$A_S$	=	angeströmte Steinfläche [m <sup>2</sup> ]
$A_{\perp}$	=	Fließquerschnitt [m <sup>2</sup> ]
$b_{So}$	=	Sohlenbreite [m]
$c$	=	relative Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche [ - ]
$c_{Kurve}$	=	relative kurveninduzierte Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche [ - ]
$c_{Lenkbuhne}$	=	relative lenkbuhneninduzierte Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche [ - ]
$c_L$	=	Auftriebsbeiwert [ - ]
$c_W$	=	Formwiderstandsbeiwert [-]
$C$	=	Chezy-Beiwert [m <sup>1/2</sup> /s]
$dl$	=	Linienelement [m]
$d_{m,Dx}$	=	mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht [mm]
$d_S$	=	äquivalenter Steindurchmesser [m]
$f$	=	physikalische Größe
$f_B$	=	Leitelementfunktion
$F_L$	=	Auftriebskraft (Synonym: Liftkraft) [N]
$F_z$	=	Zentrifugalkraft [N]
$F_{\tau}$	=	Widerstandskraft [N]
$Fr_{HQ100}$	=	Froude-Zahl bei $HQ_{100}$ [ - ]
$g$	=	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$G$	=	Gewichtskraft unter Auftrieb [N]
$G_P$	=	hangabwärtsgerichtete Komponente der Gewichtskraft $G$ [N]
$h$	=	Wassertiefe, Fließtiefe [m]

$h_b$	=	mittlere Wassertiefe bei $Q_b$ [m]
$h_B$	=	Höhe des Bauwerks (z.B. Leitelement, Lenkbuhne) [m]
$h_{B,m}$	=	mittlere Bauwerkshöhe; Bezugsniveau: mittlere Sohlenlage [m]
$h_{HQ100}$	=	Wassertiefe bei $HQ_{100}$ [m]
$h_m$	=	mittlere Wassertiefe [m]
$h_N$	=	Normalabflusstiefe [m]
$h_o$	=	Wassertiefe oberstrom des Lenkbuhnenbereichs [m]
$h_u$	=	Wassertiefe unterstrom des Lenkbuhnenbereichs [m]
$H$	=	relative Bauwerkshöhe [ - ]
$H_b$	=	relative Höhe bei $Q_b$ [ - ]
$HQ_{100}$	=	Hundertjähriger Hochwasserabfluss [ $m^3/s$ ]
$I_E$	=	Energieliniengefälle [ - ]
$l$	=	Länge des Bauwerks (z.B. Leitelement, Lenkbuhne) [m]
$l_0$	=	Sohlenneigung [ - ]
$l_p$	=	auf die Gewässerbreite projizierte Länge [m]
$k_s$	=	äquivalente Sohlenrauheit [ - ]
$L$	=	Drehimpuls [ $kg \cdot m^2/s$ ]
$L_B$	=	relative Länge [ - ]; $L_B = l_p / b$
$L_m$	=	mittlerer Drehimpuls [ $kg \cdot m^2/s$ ]
$m$	=	Masse [kg]
$m_o$	=	Widerstandsparameter [ - ]
$M_K$	=	krümmungsinduziertes Drehmoment [Nm]
$M_B$	=	vaneinduziertes Drehmoment [Nm]
$n$	=	horizontale Kurvenkoordinate, lateral zur Fließrichtung orientiert [m]
$n_B$	=	Anzahl der notwendigen Leitelemente [ - ]
$P$	=	Strömungskraft [N]
$Q$	=	Abfluss [ $m^3/s$ ]
$Q_b$	=	Bemessungsabfluss [ $m^3/s$ ]
$r$	=	Radius, Krümmungsradius [m]
$r_m$	=	mittlerer Radius [m]
$r_T$	=	Kurvenradius entlang des Talwegs [m]
$R$	=	Haftreibungskraft [N]

$s$	=	horizontale Kurvenkoordinate, in Fließrichtung orientiert [m]
$t$	=	Zeit [s]
$T$	=	Überströmungshöhe bei Bemessungsabfluss [m]
$u$	=	lokale Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]
$u_b$	=	Anströmgeschwindigkeit beim Bemessungsabfluss $Q_b$ [m/s]
$u_B$	=	lokale Geschwindigkeit in Fließrichtung mit Lenkbuhnen [m/s]
$u_m$	=	querschnittsgemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]
$u_{m,o}$	=	mittlere Fließgeschwindigkeit oberstrom des Lenkbuhnenbereichs [m/s]
$u_{m,u}$	=	mittlere Fließgeschwindigkeit unterstrom des Lenkbuhnenbereichs [m/s]
$u_{Ufer}$	=	ufernahe Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]
$\bar{u}$	=	über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]
$\bar{u}_b$	=	über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung beim Bemessungsabfluss $Q_b$ [m/s]
$\bar{u}_B$	=	über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung mit Lenkbuhnen [m/s]
$u_*$	=	(Sohlen-) Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
$v$	=	Geschwindigkeit lateral zur Fließrichtung orientiert [m/s]
$v_s$	=	Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche [m/s]
$\tilde{v}$	=	tiefengemittelte Quergeschwindigkeit, aus Kontinuitätsgründen gilt $\tilde{v} = 0$
$w$	=	Geschwindigkeit senkrecht nach oben orientiert [m/s]
$x_o$	=	x-Wert oberstrom des Lenkbuhnenbereichs [m]
$x_u$	=	x-Wert unterstrom des Lenkbuhnenbereichs [m]
$y$	=	Koordinate, lateral zur Fließrichtung orientiert [m]
$z$	=	vertikale Koordinate, senkrecht zur Fließrichtung orientiert [m]
$z_s$	=	Koordinate $z$ an der Wasseroberfläche [m]
$\alpha$	=	Inklinationswinkel, Anströmungswinkel, Anstellwinkel [°]
$\alpha_{so}$	=	Neigungswinkel der Sohle [°]
$\alpha_v$	=	Sekundärströmungskoeffizient [ - ]
$\alpha'$	=	Korrekturkoeffizient [ - ]; effektiver Anströmungswinkel [°]
$\Gamma$	=	Zirkulation [m <sup>2</sup> /s]

$\varepsilon$	=	Verstärkungskoeffizient [ - ]
$\varepsilon_V$	=	Verhältnis des Volumens der Lenkbuhnen zum Gesamtvolumen
$\varepsilon_0$	=	Verhältnis der Lenkbuhnengrundfläche zur Gesamtgrundfläche des Gerinnes (Gl. 1.1)
$\eta$	=	Winkel, um den der Anströmungswinkel $\alpha$ durch Randwirbel verringert wird
$\theta$	=	Krümmungswinkel des betrachteten Flussabschnitts [ - ]
$\kappa$	=	von Kármán-Konstante, i.d.R. $\kappa = 0.4$
$\lambda$	=	Darcy-Weisbach-Widerstandsbeiwert [ - ]
$\lambda_B$	=	Widerstandsbeiwert der Lenkbuhnen [ - ]
$\lambda_{\text{ges}}$	=	Widerstandsbeiwert der mit Lenkbuhnen verbauten Rinne [ - ]
$\lambda_0$	=	Widerstandsbeiwert der unverbauten Rinne [ - ]
$\Lambda$	=	Seitenverhältnis [ - ]
$\nu_t$	=	turbulente Viskosität
$\rho$	=	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_0$	=	Sohlenschubspannung [N/m <sup>2</sup> ]
$\mathbf{v}$	=	Geschwindigkeitsvektor [m/s]
$\varphi$	=	innerer Reibungswinkel [°]
$\omega$	=	Winkelgeschwindigkeit [1/s]
$\Omega$	=	Wirbelstärke, vektorielles Geschwindigkeitspotential [1/s]

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1: Rotierende Festkörper sind starre Wirbel (links); Geschwindigkeitsverteilung in einem starren Wirbel (rechts; Lugt 1979) .....	5
Abb. 2.2: Prinzipskizze zur Berechnung des Drehimpulses $L$ in einer Messvertikalen .....	6
Abb. 2.3: Entstehung der Sekundärströmung in einer Krümmung (Scheuerlein 1984) .....	8
Abb. 2.4: Verteilung der Geschwindigkeit $u$ entlang eines Kanalbogens in schematischer Isotachendarstellung (Meckel 1978, modifiziert) .....	9
Abb. 2.5: Verteilung der Wandschubspannung über die Profilberandung eines ausgewählten Trapezprofils in einem geraden, regelmäßig geformten Fließgewässerabschnitt (Schröder & Römisch 2001, nach Chow 1959) .....	10
Abb. 2.6: Strömungsverteilung am Beginn einer Krümmung (Malcherek 1999, modifiziert) ..	13
Abb. 3.1: Schematische Darstellung des durch ein einzelnes Leitelement und eine Dreiergruppe der Elemente hervorgerufenen Strömungsbildes (Odgaard 2009). .....	17
Abb. 3.2: Durch eine Dreiergruppe Leitelemente hervorgerufene Sedimentumlagerung (Odgaard & Wang 1991) .....	17
Abb. 3.3: Schematische Isotachendarstellung einer geraden Gewässerstrecke ohne (links) und mit Lenkbuhnen (rechts; Sindelar & Mende 2009, modifiziert) .....	18
Abb. 3.4: Bemessungsgrößen von Leitelementen; Situation (links; Fließrichtung von unten nach oben); Schnitt A-A (rechts; Odgaard 2009, modifiziert) .....	19
Abb. 3.5: Vereinfacht dargestellte Hydraulik und Sohlenmorphologie bei Strömungstrichtern: a) deklinante und b) inklinante Anordnung (Sindelar & Mende 2009) .....	21
Abb. 3.6: Darstellung von „leitschaukelartigen Flächen“ zur Vermeidung von Ablagerungen (Österreichisches Patentamt 1933) .....	22
Abb. 3.7: Grundwalze entlang einer inklinant angeordneten Grundschwelle (Gehrig 1958) ..	23
Abb. 3.8: Strömungsverlauf über Grundswellen in Abhängigkeit von den Neigungen der Luv- und Leeseiten (Gehrig 1958) .....	23
Abb. 3.9: Lokale Fließstrukturen (oben) und Geschiebepfade (unten) an einem überströmten Leitelement, Fließrichtung jeweils von oben nach unten (Tan et al. 2005) .....	25
Abb. 3.10: V-förmige Rippen in einer entleerten Bootsgasse (links); Bootsgasse in Betrieb (rechts; Fotos: Faltin) .....	26
Abb. 3.11: Mit Rauch visualisierter Randwirbel an einer Tragfläche (Download am 07.12.2013 unter <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airplane_vortex_edit.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airplane_vortex_edit.jpg</a> ) .....	27
Abb. 3.12: Aufbau einer Lenkbuhne aus Blocksteinen in der Salza / Gemeinde Gußwerk (Quelle: Baubezirksleitung Bruck an der Mur, 2009) .....	28

Abb. 3.13: Lenkbuhne aus Geröll und Kies unmittelbar nach der Fertigstellung (links, Fließrichtung von links nach rechts; Foto: Tent 2010); mit Lenkbuhnen und Kiesschüttungen restaurierter Abschnitt der Este in der Lüneburger Heide bei einem mittleren Abfluss (rechts, Blick in Fließrichtung; Tent 2011).....	29
Abb. 3.14: Leitelemente aus I-Stahlträgern in Kombination mit Holzbohlen (links) und aus gerammten Holzpfählen (Odgaard & Wang 1990).....	30
Abb. 3.15: Prinzipskizze eines doppelt gekrümmten Leitelements aus bewehrtem Beton mit Pfahlgründung (links) (Odgaard 2009); Leitelemente aus Polyethylen-Platten (Fitzpatrick et al. 2004) .....	30
Abb. 3.16: Anwendungsmöglichkeiten von Leitelementen und Lenkbuhnen – überbreite Gewässerabschnitte (links), Ausleitungen (Mitte), Vereinigungen (rechts; Odgaard & Wang 1991, modifiziert).....	31
Abb. 3.17: Ausführungsbeispiel einer Lenkbuhnengruppe zum Schutz eines Prallufers mit uferparallel verlaufender Bundesstraße an der Salza / Steiermark (Grober 1998, modifiziert) .....	32
Abb. 3.18: Lenkbuhnen zum Schutz eines Prallufers der Mürz / Steiermark. Die Lenkbuhnen schließen untermittelbar an den bestehenden Blocksatz am linken Ufer an, der vollständig erhalten werden konnte und seit dem Einbau stabil ist (Blick in Fließrichtung; Mende 2012). .....	33
Abb. 3.19: Leitelemente zur Verhinderung von Krümmungserosion: Krümmungsinduzierte Sekundärströmung (links oben); die vane-induzierte Sekundärströmung hebt die krümmungsinduzierte auf, wodurch das Prallufer stabilisiert wird (links unten); typische Anordnung von Leitelementen in Flusskrümmungen (rechts; Odgaard 2009).....	34
Abb. 3.20: Einbau von Iowa Vanes an einem erodierenden Prallufer des Wapsipinicon River bei Niedrigwasserabfluss im Jahr 1988 (links). Der gleiche Flussabschnitt ist zwei Jahre später durch deutliche Verlandung im Bereich des Prallufers gekennzeichnet (rechts; Download am 12.06.2005 unter <a href="http://www.ihr.uiowa.edu/projects/iowaVanes">http://www.ihr.uiowa.edu/projects/iowaVanes</a> ).....	34
Abb. 3.21: Inklinanter Strömungstrichter zum Schutz der Widerlager einer oberhalb liegenden Brücke und zur Entlastung der Ufer unterhalb wenige Wochen nach Einbau (Mende 2012).....	35
Abb. 3.22: Schematisch dargestellte Leitelementanordnung zum Uferschutz in einer geraden Strecke (links); Blick gegen die Fließrichtung in eine trockengelegte, als Halbmodell dienende Versuchsrinne mit beweglicher Sohle und einseitig angeordneten Leitelementen (rechts; Odgaard & Wang 1991, modifiziert).....	36
Abb. 3.23: Buhne („Stream Barb“) mit einheitlicher Rückenneigung - Schnitt entlang der Bühnenachse (NRCS 2005).....	37
Abb. 3.24: Buhne („Bendway Weir“) mit horizontalem Rücken (Thornton et al. 2005) .....	37
Abb. 3.25: Wechselsprung im Umfeld einer Stream Barb bei 75% des bordvollen Abflusses (NRCS 2005).....	38

Abb. 3.26: Situation vor (links) und zwei Monate nach dem Einbau von Lenkbuhnen (Mitte); mit Holzeinstreu visualisierte Oberflächenströmung bei erhöhtem Abfluss (rechts); Blick in Fließrichtung (Mende & Sindelar 2010).....	39
Abb. 3.27: Voralpenfluss Taverna / Kanton Freiburg wenige Monate nach der Umgestaltung – die unverbauten und ausschließlich mit Lenkbuhnen gesicherten Ufer bieten eine gute Quervernetzung (Foto: Mende 2012) .....	40
Abb. 4.1: Schematische Darstellung des durch ein einzelnes Leitelement hervorgerufenen Strömungsbildes mit Definition der Koordinaten, der Geschwindigkeitskomponenten, des Inklinationswinkels, der Fließtiefe und der Kräfte am Element (Odgaard 2009, modifiziert) ..	43
Abb. 4.2: Aus Messungen abgeleitete mittlere Auftriebsbeiwerte $c_L$ und Formwiderstandsbeiwerte $c_W$ eines ebenen dünnwandigen Leitelements mit $\Lambda = h_B/l = 0.3$ (Odgaard & Spoljaric 1986a, modifiziert) .....	44
Abb. 4.3: Definitionsskizze einer krümmungsinduzierten Sekundärströmung (oben) und einer vaneinduzierten Sekundärströmung (unten; Odgaard & Mosconi 1987, modifiziert) .....	46
Abb. 4.4: Draufsicht auf den Bauwerkskolk an einem Leitelement bei $\alpha = 40^\circ$ (Marelius & Sinha 1998) .....	48
Abb. 4.5: Induzierter Drehimpuls $L$ bei $x = 48$ cm in Abhängigkeit vom Inklinationswinkel $\alpha$ (Marelius & Sinha 1998) .....	48
Abb. 4.6: Einseitige Leitelementanordnung in einer geraden Versuchsrinne (Wang & Odgaard 1993, modifiziert) .....	52
Abb. 4.7: Geschwindigkeitsverteilung innerhalb und außerhalb des Leitelementbereichs; a) dimensionslose Quergeschwindigkeit $v/u_m$ [-] und b) dimensionslose Fließgeschwindigkeit $u/u_m$ [m/s] (Wang & Odgaard 1993, modifiziert) .....	52
Abb. 4.8: Rechnerisches Verhältnis von Inklinationswinkel $\alpha$ zu relativer Quergeschwindigkeit $c$ nach Wang & Odgaard (1993); Beispiel: $a_x/h_B = 6$ .....	54
Abb. 4.9: Entstehung von Wirbelflächen bei Rechteckflügeln (oben) und Deltaflügeln (unten); a) großer Anstellwinkel (nichtlineare Theorie) und b) kleiner Anstellwinkel (lineare Theorie) (Gersten 1960) .....	55
Abb. 4.10: Nichtlineare Charakteristik zwischen Anstellwinkel $\alpha$ und Auftriebsbeiwert $c_L$ bei Tragflügeln mit kleinem Seitenverhältnis (Gersten 1960, modifiziert) .....	56
Abb. 4.11: Gemessene Auftriebsbeiwerte $c_L$ in Abhängigkeit vom Anstellwinkel $\alpha$ für Rechteckflügel mit Seitenverhältnissen $\Lambda$ (hier: Spannweiten-Tiefen-Verhältnissen) von 0.2 bis 5; Kurve 1: lineare Theorie, Kurve 2: nichtlineare Theorie nach Gersten (Gersten 1960, modifiziert) .....	56
Abb. 5.1: Schwarzwaldfluss Wiese im Bereich der Rossschwemme vor dem Einbau von Lenkbuhnen (Foto: Koll 2006) .....	58
Abb. 5.2: Strömungsgleichrichter im Zulaufbereich der Versuchsrinne (links); raue Sohle der Versuchsrinne (rechts) .....	59



Abb. 5.3: In den Laborunteruntersuchungen verwendete Lenkbuhnen .....	60
Abb. 5.4: Untersuchte Lenkbuhnenanordnungen bei einem Inklinationswinkel $\alpha = 60^\circ$ mit Lage der Messprofile .....	62
Abb. 5.5: Sensor und Signalwege eines 3D-ADV (SonTek 2007) .....	64
Abb. 5.6: Querprofil mit Messpunkten des Standardmessrasters .....	66
Abb. 5.7: Lage der Messprofile beim Standardmessraster .....	66
Abb. 5.8: Querprofil mit Messpunkten des Messrasters eng .....	67
Abb. 5.9: Lage der Messprofile beim Messraster eng .....	67
Abb. 6.1: Einfluss des Inklinationswinkels $\alpha$ auf die Geschwindigkeitsverteilung $u$ [cm/s] (Beispiel: $H = 1/10$ , $a_x = l_p = 30$ cm, QP 5 ( $x = 210$ cm)) .....	70
Abb. 6.2: Draufsicht auf die tiefengemittelte Geschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich $\bar{u}_B$ (Beispiel: $H = 1/10$ , $\alpha = 60^\circ$ , $a_x = l_p = 30$ cm) .....	70
Abb. 6.3: Änderung der Geschwindigkeitsverteilung $u$ [cm/s] mit dem Fließweg (Beispiel: $H=1/10$ , $\alpha=60^\circ$ , $a_x = l_p = 30$ cm) .....	71
Abb. 6.4: Quergeschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Inklinationswinkel $\alpha$ (Beispiel: $H = 1/10$ , $a_x = l_p = 30$ cm, QP 5 ( $x = 210$ cm)) .....	72
Abb. 6.5: Quer- und Vertikalgeschwindigkeitsverteilung $v$ und $w$ in Abhängigkeit vom Inklinationswinkel (Beispiel: $H = 1/10$ , $a_x = l_p = 30$ cm, QP 5 ( $x = 210$ cm)) .....	73
Abb. 6.6: Visualisierte Oberflächenströmung bei $H = 1/10$ , $a_x = l_p = 30$ cm; $\alpha = 30^\circ$ (oben), $60^\circ$ (Mitte), $90^\circ$ (unten) .....	73
Abb. 6.7: Verteilung der Drehimpulse $L$ über die Gerinnebreite (Beispiel: $\alpha = 30^\circ$ , $a_x = l_p = 30$ cm, $H = 1/10$ ) .....	74
Abb. 6.8: Wellenbildung in Abhängigkeit vom Bühnenabstand $a_x$ (Beispiel: $\alpha = 90^\circ$ , $H = 1/10$ , $a_x = 30$ cm (a) und $60$ cm (b)); Bereich der Fotos: $x \approx 2.0 \div 2.8$ m .....	75
Abb. 6.9: Wellenbildung in Abhängigkeit von der relativen Höhe $H$ (Beispiel: $\alpha=60^\circ$ , $a_x = l_p = 30$ cm; $H = 1/4$ (a), $1/6$ (b), $1/8$ (c), $1/10$ (d)); Bereich der Fotos: $x \approx 2.0 \div 2.8$ m .....	76
Abb. 6.10: Sohlenmorphologie innerhalb (a) und unterstrom (b) der Lenkbuhnenstrecke im Laborgerinne; Blick gegen die Fließrichtung .....	77
Abb. 6.11: Situation vor (links) und zwei Monate nach dem Einbau von Lenkbuhnen aus Blocksteinen (Mitte); visualisierte Oberflächenströmung bei erhöhtem Abfluss im Oktober 2008 (rechts). Blick in Fließrichtung (Mende & Sindelar 2010) .....	78
Abb. 6.12: Pralluferschutz mit inklinanten Lenkbuhnen am Aschbach bei Gußwerk / Steiermark; links: Gesamtansicht (Blick gegen die Fließrichtung); rechts: Detailaufnahme mit Geschiebeablagerungen am buhnenseitigen Ufer und Eintiefungen entlang der Bühnenköpfe .....	78

Abb. 6.13: Lenkbuhnen zum Schutz eines Prallufers an der Taverna / Kanton Freiburg; links: Hochwasser (ca. $HQ_2 = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ (Werdenberg et al. 2012a)); rechts: Niedrigwasser mit eingezeichneten Kolkiefen unterhalb der Lenkbuhnenköpfe (Foto: Werdenberg 2012) .....	79
Abb. 6.14: Näherungsfunktion zur Beschreibung der Drehimpulsverteilung $L$ über die Gerinnebreite (Beispiel: $\alpha = 30^\circ$ , $a_x = l_p = 30 \text{ cm}$ , $H = 1/10$ ).....	81
Abb. 6.15: Gemessene Quergeschwindigkeiten $v$ in einer Messvertikale mit linearer Näherungsfunktion (Beispiel: $\alpha = 30^\circ$ , $a_x = l_p = 30 \text{ cm}$ , $H = 1/10$ ; $y = 8 \text{ cm}$ ).....	81
Abb. 6.16: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit $c$ und dem relativen Abstand $A_B$ für $\alpha = 30^\circ$ und $y = 8 \text{ cm}$ .....	82
Abb. 6.17: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit $c$ und dem relativen Abstand $A_B$ für $\alpha = 60^\circ$ und $y = 8 \text{ cm}$ .....	82
Abb. 6.18: Vergleich der Entwicklung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit in Fließrichtung mit Lenkbuhnen $\bar{u}_B$ und ohne Lenkbuhnen $\bar{u}$ (Beispiel: $\alpha = 60^\circ$ , $a_x = l_p = 30 \text{ cm}$ , $H = 1/10$ ; $y = 3 \text{ cm}$ ).....	85
Abb. 6.19: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit $\bar{u}$ bei $y = 3 \text{ cm}$ in Abhängigkeit vom relativen Abstand $A_B$ bei einem Inklinationswinkel von $\alpha = 60^\circ$ .....	86
Abb. 6.20: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit $\bar{u}$ bei $y = 8 \text{ cm}$ in Abhängigkeit vom relativen Abstand $A_B$ bei einem Inklinationswinkel von $\alpha = 60^\circ$ .....	86
Abb. 6.21: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit $\bar{u}$ bei $y = 20 \text{ cm}$ in Abhängigkeit vom relativen Abstand $A_B$ bei einem Inklinationswinkel von $\alpha = 60^\circ$ .....	87
Abb. 6.22: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit $\bar{u}$ bei $y = 32 \text{ cm}$ in Abhängigkeit vom relativen Abstand $A_B$ bei einem Inklinationswinkel von $\alpha = 60^\circ$ .....	87
Abb. 6.23: Änderung der lokalen Fließgeschwindigkeit $u$ bei $y = 40 \text{ cm}$ in Abhängigkeit vom relativen Abstand $A_B$ bei einem Inklinationswinkel von $\alpha = 60^\circ$ .....	88
Abb. 6.24: Änderung der Fließtiefe $h$ mit dem Fließweg (Beispiel: $\alpha=60^\circ$ , $a_x = l_p = 30 \text{ cm}$ , $H=1/10$ bis $1/4$ ; Lenkbuhnen von $x = 0$ bis $300 \text{ cm}$ ) .....	90
Abb. 6.25: Verhältnis von relativem Abstand $A_B$ zum Anstieg der Wassertiefe $h$ bei einem Inklinationswinkel $\alpha = 60^\circ$ .....	91
Abb. 6.26: Widerstandsbeiwerts $\lambda_B$ der Lenkbuhnen in Abhängigkeit vom relativen Abstand $A_B$ bei einem Inklinationswinkel von $\alpha = 60^\circ$ .....	93
Abb. 7.1: Zusammenhang zwischen Gefälle und Windungsgrad (engl. <i>Sinuosity</i> ) in natürlichen Flüssen (Rosgen 2006) .....	96
Abb. 7.2: Längsprofil der Wiese im Stadtgebiet von Lörrach mit der Näherungsfunktion „mittlere Sohlenebene“ (Mende & Koll 2006) .....	97
Abb. 7.3: Lenkbuhnenaufbau bei Einbau in Kurvenkolk (IUB Engineering AG 2013).....	98
Abb. 7.4: Minimaler Steindurchmesser als Funktion der Schubspannung bei bordvollem Abfluss (Rosgen 2001).....	102

Abb. 7.5: Vereinfachtes Kräftegleichgewicht am Einzelstein (LfU 2000, modifiziert) .....	103
Abb. 7.6: Lenkbuhnenaufbau mit Stützstein zur Nachkolksicherung (Glüh 2005) .....	104
Abb. 7.7: Abschätzung der Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit (Beispiel: $\alpha = 60^\circ$ , $H = 1/10$ , $A_B = 6$ ).....	106
Abb. 7.8: Schematische Darstellung der Sekundärströmungen in einer Flusskrümmung mit inklinanten Lenkbuhnen (nach Grober 1998, modifiziert).....	109
Abb. 7.9: Ermittlung des maximalen relativen Abstands ( $\alpha = 60^\circ$ ).....	111

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1: Kategorien des Parameters „hydraulische Belastung“ ingenieurbilogischer Bau- weisen (Stowasser 2011)	10
Tab. 2.2: Verstärkungskoeffizient $\varepsilon$ in Abhängigkeit von der Lage im Gewässerverlauf (Schröder & Römisch 2001)	11
Tab. 5.1: Wesentliche Kennzahlen des Schwarzwaldflusses Wiese im Bereich der Ross- schwemme (km 2+078 bis 1+709)	59
Tab. 5.2: Variierte Lenkbuhnenparameter	61
Tab. 5.3: Vom Versuchsdurchfluss abhängige Größen	68
Tab. 6.1: Widerstandsbeiwerte $\lambda_0$ der unverbauten Rinne in Abhängigkeit vom Abfluss Q	92
Tab. 7.1: Belastbarkeiten ingenieurbilogischer Bauweisen (Gerstgraser 2004, modifiziert)	108



# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung

Der Flussbau ist in den letzten Jahrzehnten deutlich naturnäher geworden. Zentrales Ziel des heutigen Flussbaus ist eine eigendynamische Gewässerentwicklung. Die wesentliche Voraussetzung hierfür ist jedoch ein ausreichender Gewässerentwicklungsraum, der den Gewässern vielfach nicht zurückgegeben werden kann. Ein Großteil flussbaulicher Maßnahmen beinhaltet daher nach wie vor den Ausbau der Sohle und der Ufer. Dies gilt sowohl für Hochwasserschutzmaßnahmen als auch für Renaturierungen. Wegen des fehlenden Gewässerentwicklungsraums besteht die Forderung, dass die Ufer und die Sohle mehr oder weniger hart definiert werden müssen, um der maximalen hydraulischen Belastung standzuhalten und somit morphologischen Veränderungen wie z.B. Ufererosion vorzubeugen.

Zur Stabilisierung von Fließgewässern bestehen grundsätzlich zwei Lösungsansätze. Der gängige Lösungsansatz ist die Anpassung des Gewässers (Ufer, Sohle) zur Erhöhung des Widerstands. Hierzu werden vor allem Längsverbauungen wie Blocksatz oder Krainerwände eingesetzt. Dieser Ansatz ist jedoch mit hohen Kosten und ökologischen Nachteilen (z.B. schlechte Wasser-Land-Vernetzung) verbunden. Darüber hinaus ist er eigentlich als „Symptombehandlung“ zu bezeichnen, da als wesentliche Ursache morphologischer Veränderungen in Fließgewässern die Strömung zu nennen ist.

Der zweite Lösungsansatz beinhaltet die Verringerung der Beanspruchung, wobei gezielt die Strömung angepasst wird. Der Ansatz stellt damit eine ursachenorientierte Herangehensweise dar. Dieser Lösungsansatz wird vor allem mit Bauweisen verfolgt, deren Wirkung im Wesentlichen auf einer lokalen Erhöhung der Rauheit und damit einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit basiert, wie z.B. „klassische Buhnen“ oder ingenieurbioologische Bauweisen wie Raubäume und Biogene Maschinelle Ufersicherung (BMU). Ihre Verwendung ist jedoch in der Regel mit einem Anstieg des Hochwasserstands verbunden, weshalb sie nur bei ausreichendem Freibord Anwendung finden. Unter beengten Platzverhältnissen (z.B. in Ortslagen) können sie kaum eingesetzt werden. Darüber hinaus ist der Einsatz der als besonders naturnah zu bezeichnenden ingenieurbioologischen Bauweisen bei großen hydraulischen Belastungen und großen Mittelwasserfließtiefen (z.B. im Bereich von Kurvenkolken) eingeschränkt und erfordert vielfach eine Kombination mit „toten“ Sicherungen (Oplatka 1998, Gerstgraser 2000, Stowasser 2011) wie z.B. Steinschüttungen als Fußsicherung.

Eine weit weniger bekannte Methode zur Verringerung der Beanspruchung als die Erhöhung der Rauheit ist die Induzierung großräumiger Sekundärströmungen, die mit der Hauptströmung interagieren. Ein aus der Natur bekanntes Beispiel für eine solche Interaktion ist die Kurvenströmung: In einer Flusskurve kommt es zu einer Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums der Hauptströmung in Richtung Prallufer und im weiteren Verlauf in Richtung Sohle (Rozovskii 1957, Meckel 1978). Hieraus resultieren in der Regel Erosionen am Prallufer und die Ausbildung eines Kurvenkolks, das Gleitufer ist dagegen durch Sedimentations-tendenz und geringere Fließgeschwindigkeiten gekennzeichnet.

Werden Sekundärströmungen gezielt induziert, kann der genannte Prozess, der dem Menschen an Fließgewässern häufig Probleme bereitet, nutzbar gemacht werden. Es können prognostizierbare Veränderungen der Geschwindigkeitsverteilung und der Querprofilgeometrie hervorgerufen werden, durch die auch der Anwendungsbereich ingenieurbilogischer Maßnahmen erweitert wird. Dies ist die Grundidee des „Instream River Trainings“ (Mende & Sindelar 2010, Mende 2012).

Die bekanntesten Bauweisen, die nach diesem Prinzip wirken, sind „Leitelemente“ (Wahrheit-Lensing & Richter 1996), die im englischen Sprachgebrauch als „Submerged Vanes“ oder „Iowa Vanes“ (z.B. Odgaard & Kennedy 1983, Gupta et al. 2006, Odgaard 2009) bezeichnet werden. Zu diesen schlanken, überströmbaren Gewässereinbauten, die in der Regel aus Betonelementen oder Spundwänden erstellt werden, erfolgten insbesondere am Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) systematische Untersuchungen zur Optimierung der Anordnung und konstruktiven Gestaltung sowie zur Herleitung eines Bemessungsverfahrens. Trotz ihrer nachgewiesenen guten Wirksamkeit hinsichtlich des Uferschutzes und Geschiebemanagements konnten sich die Iowa Vanes insbesondere in Europa jedoch nicht etablieren, was vermutlich auf die naturferne Ausbildung und die fehlende Eignung für Gewässer mit großer hydraulischer Belastung zurück zu führen ist (Mende 2012).

Unabhängig von der Forschungstätigkeit am IIHR entwickelte Otmar Grober / Baubezirksleitung Bruck a.d. Mur in der Steiermark mit der „Lenkbühne“ Anfang der 1990er Jahre eine naturnahe Bauweise des Instream River Trainings. Als Baumaterial werden unbehauene Blocksteine eingesetzt, die häufig mit ingenieurbilogischen Baustoffen kombiniert werden. Lenkbühnen sind auch für Gebirgsbäche und -flüsse mit großer hydraulischer Belastung geeignet (Mende & Sindelar 2010).

Trotz mehr als zwanzigjähriger Praxiserfahrung mit Lenkbühnen bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur und guter Wirkung hinsichtlich des Uferschutzes wurde diese naturnahe Bauweise bisher nicht wissenschaftlich untersucht. Folglich wurden auch keine wissenschaftlich fundierten Bemessungsansätze entwickelt.

Fehlende bzw. nicht ausreichende Bemessungsansätze führen dazu, dass die uferschützende Wirkung ohne jahrelange Praxiserfahrungen, wie sie bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur vorliegen, nicht gewährleistet werden kann. Das Fehlen wissenschaftlich basierter Bemessungsansätze steht damit einer weiten Verbreitung der ausgesprochen naturnahen und kostengünstigen Lenkbühnen entgegen, die durch ihre belastungsreduzierende Wirkung auch eine vermehrte Anwendung ingenieurbilogischer Bauweisen ermöglichen.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung wissenschaftlich fundierter Bemessungsansätze für Lenkbühnen zum Uferschutz. Es sollen Bemessungsansätze für gerade Gewässerabschnitte und Krümmungen entwickelt werden. Die Ansätze sollen derart aufbereitet und dargelegt werden, dass sie für den Praktiker leicht nachvollziehbar und damit anwenderfreundlich sind.

Die Grundlage zur Entwicklung von Bemessungsansätzen ist ein umfangreiches Prozessverständnis, das im Rahmen der Arbeit fast vollständig entwickelt werden muss. Das grundlegende Wirkungsprinzip, also die Induzierung von Sekundärströmungen, wurde zwar in Un-

tersuchungen am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig bereits nachgewiesen (Meyenburg 2007). Der genaue Einfluss der Lenkbuhnenanordnung und -geometrie auf das Strömungsbild und insbesondere die Geschwindigkeitsverteilung und daraus resultierende hydraulische Belastung der Ufer wurden jedoch noch nicht aufgezeigt. Insbesondere sollen daher folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Wie wirken sich Lenkbuhnen auf das Strömungsbild und dabei vor allem auf die Längs- und Quergeschwindigkeitsverteilung aus?
- Was sind die maßgeblichen Einflussgrößen, die die Veränderungen des Strömungsbilds bewirken?
- Wie groß sind die hervorgerufenen Veränderungen in Abhängigkeit von der Anordnung und Geometrie der Lenkbuhnen? Wie können diese Veränderungen analytisch beschrieben werden?

Die Fragen sollen mit Hilfe von Laboruntersuchungen beantwortet werden. Aufgrund des großen Wissensdefizits zu Lenkbuhnen sind noch wesentliche Grundlagen zu erarbeiten. Es ist daher eine Beschränkung auf relativ wenige Einflussparameter notwendig. Aus diesem Grund sollen die Untersuchungen an einer geraden Laborrinne mit fester Sohle durchgeführt werden. Der Fokus liegt auf der Erfassung des Strömungsbildes, es sollen vor allem mehrdimensionale Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt werden. Abgeleitet aus der jeweils in Abhängigkeit von der Lenkbuhnenanordnung und -geometrie erfassten Änderung der Geschwindigkeitsverteilung und der zu definierenden Stärke der induzierten Sekundärströmung werden anschließend die praxisnahen Bemessungsansätze für Flusskurven bzw. gerade Gewässerabschnitte entwickelt.

Im Rahmen der Arbeit wird in Kapitel 2 zunächst auf das Thema Sekundärströmungen eingegangen und ihre Ursache und Wirkung beschrieben. Kapitel 3 gibt einen umfassenden Überblick zu uferschützenden Bauweisen, deren Wirkung auf einer Reduzierung der hydraulischen Belastung der Ufer durch die Induzierung von Sekundärströmungen basiert. In Kapitel 4 wird die Theorie zu Leitelementen aufbereitet und ihre Übertragbarkeit auf Lenkbuhnen untersucht. Die daraus hervorgehenden offenen Fragen begründen die durchgeführten experimentellen Untersuchungen, die in Kapitel 5 erläutert werden. Die Versuchsergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen zum Wirkungsmechanismus und die analytische Untersuchung des Einflusses maßgeblicher dimensionsloser Parameter auf das Strömungsbild werden in Kapitel 6 aufbereitet. Darauf aufbauend werden in Kapitel 7 die Bemessungsansätze abgeleitet und anhand von Beispielrechnungen erläutert.

## 2 Sekundärströmungen

### 2.1 Definitionen

Der Begriff „Sekundärströmung“ beschreibt eine senkrecht zur Hauptströmung gerichtete Strömungskomponente. In Abhängigkeit von den verursachenden Kräften unterscheiden Prandtl et al. (1993) drei Arten von Sekundärströmungen:

- „Sekundärströmungen erster Art“ werden durch die in Krümmungen wirkenden Zentrifugalkräfte verursacht. Sie werden daher im Weiteren auch als „krümmungsinduzierte Sekundärströmungen“ bezeichnet.
- „Sekundärströmungen zweiter Art“ sind rauheitsinduziert. Sie treten bei turbulenter Strömung in geraden Kanälen mit nichtkreisförmigem Querschnitt auf. Die Sekundärströmungen führen hier in die Ecken des Querprofils hinein und verlaufen dann wieder zum Kanalinneren.
- „Sekundärströmungen dritter Art“ entstehen durch Schwingungen fester Körper in Flüssigkeiten.

Im Folgenden wird der Begriff Sekundärströmung verwendet, um krümmungsinduzierte Sekundärströmungen nach der Definition von Prandtl et al. (1993) sowie bauwerksinduzierte Sekundärströmungen, die den krümmungsinduzierten in ihrer Ausdehnung und ihrem Strömungsbild gleichen, zu bezeichnen. Wird nur der Begriff „Geschwindigkeit“ verwendet, ist die Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung  $u$  gemeint. Die quer dazu verlaufende Geschwindigkeitskomponente  $v$  wird als „Quergeschwindigkeit“ bezeichnet.

Die Überlagerung einer Sekundärströmung mit der Hauptströmung führt zur Ausbildung einer „Spiralströmung“, in der sich die Wasserteilchen auf einer schraubenförmigen Bahnlinie bewegen.

Sekundär- und Spiralströmungen können auch als „Wirbel“ bezeichnet werden. Ein Wirbel ist definiert als eine Vielzahl von Materieteilchen, die um ein gemeinsames Zentrum kreisen (Lugt 1979). Die Sekundärströmungen in Fließgewässern werden meist als ebener, d.h. zweidimensionaler Wirbel im Gerinnequerprofil dargestellt. Man kann ihn annähernd als „starren Wirbel“ beschreiben, bei dem die Umfangsgeschwindigkeit linear mit dem Radius zunimmt (Rozovskii 1957; Abb. 2.1). Starre Wirbel unterscheiden sich damit stark vom „Potentialwirbel“, bei dem die Umfangsgeschwindigkeit mit zunehmender Nähe zum Wirbelzentrum ansteigt.

Wirbel werden im Allgemeinen durch die Parameter des „Wirbelkerndurchmessers“, der „Wirbelstärke“ und der „Zirkulation“ beschrieben (Borosi 2003). In der Literatur zu Submerged Vanes wird vermehrt auch der „Drehimpuls“ zur Beschreibung der induzierten Wirbel verwendet (Marelius & Sinha 1998, Gupta et al. 2006).



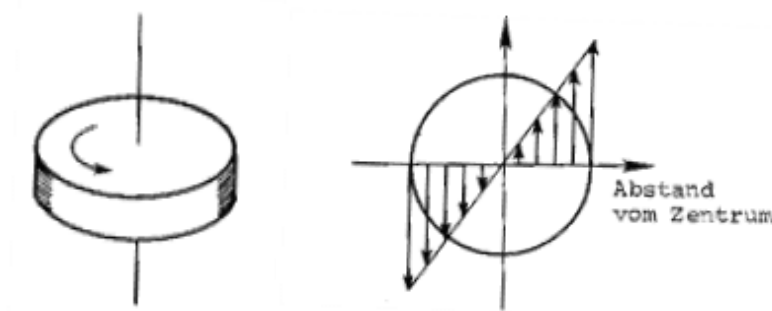


Abb. 2.1: Rotierende Festkörper sind starre Wirbel (links); Geschwindigkeitsverteilung in einem starren Wirbel (rechts; Lugt 1979)

Der „Wirbelkerndurchmesser“ ist als der räumliche Abstand der beiden Betragsmaxima der tangentialen Geschwindigkeit definiert (Borosi 2003). Bei einem starren Wirbel entspricht der Wirbelkerndurchmesser dem Wirbeldurchmesser.

Die „Wirbelstärke“ (engl. *Vorticity*) bildet in einem drehungsbehafteten Strömungsfeld ein Vektorfeld. Es ist nach Truckenbrodt (2008) definiert als

$$\Omega = \text{rot} \mathbf{v} \quad \text{Gl. 2.1}$$

mit:

$\Omega$  = Wirbelstärke, vektorielles Geschwindigkeitspotential [1/s]

$\text{rot} \mathbf{v}$  = Rotation des Geschwindigkeitsfelds [1/s]

$\mathbf{v}$  = Geschwindigkeitsvektor [m/s]

Im einfachsten Fall eines starren Wirbels ist

$$\mathbf{v} = \omega \cdot \mathbf{r} \quad \text{Gl. 2.2}$$

mit:

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit [1/s]

$\mathbf{r}$  = Radius; hier: Wirbelradius [m]

Für die „Zirkulation“  $\Gamma$  [m<sup>2</sup>/s], die als das Linienintegral der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  längs einer geschlossenen Kurve innerhalb eines Strömungsfelds definiert ist (Truckenbrodt 2008), gilt in diesem Fall

$$\Gamma = \oint_{(L)} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = v \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \omega \quad \text{Gl. 2.3}$$

mit:

$d\mathbf{l}$  = Linienelement [m]

Die zugehörige Wirbelstärke berechnet sich durch Division durch die Fläche A:

$$\Omega = \frac{\Gamma}{A} = \frac{\Gamma}{r^2 \cdot \pi} = 2 \cdot \omega \quad \text{Gl. 2.4}$$

Im Fall des starren Wirbels ist die Wirbelstärke zweimal die Winkelgeschwindigkeit.

Der „Drehimpuls“ (engl. *Moment of Momentum (MOM)*) eines Massenpunkts in einem starren Wirbel ist das Produkt aus seiner Masse  $m$ , der Geschwindigkeit  $v$  und dem Abstand  $r$  des Massenpunkts zum Drehpunkt, also zum Wirbelkern:

$$L = r \cdot m \cdot v \quad \text{Gl. 2.5}$$

mit:

$m$  = Masse [kg]

$L$  = Drehimpuls  $\left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right]$

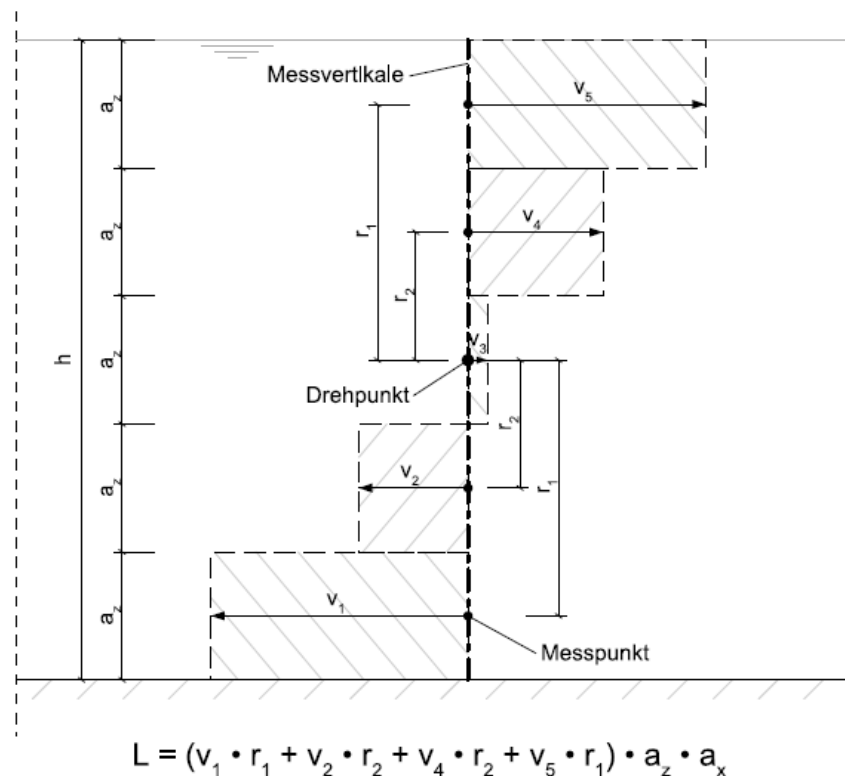


Abb. 2.2: Prinzipskizze zur Berechnung des Drehimpulses  $L$  in einer Messvertikalen

Liegen endlich viele Massenpunkte vor, so ergibt sich der Gesamtdrehimpuls als Summe der Einzeldrehimpulse der Massenpunkte (Bethge 1989). Abb. 2.2 zeigt eine Prinzipskizze zur Berechnung des Drehimpulses  $L$  in einer Messvertikalen. Dabei ist:

$h$  = Wassertiefe [m]

$v$  = Geschwindigkeit lateral zur Fließrichtung orientiert, Quergeschwindigkeit [m/s]

$a_z$  = vertikal zur Hauptströmung verlaufende Ausdehnung von  $v$  [m]

$a_x$  = Ausdehnung von  $v$  in Fließrichtung [m]

Der Drehimpuls ist proportional zur Kraft, die durch die Sekundärströmung auf Flusssohle und -ufer ausgeübt wird. Er ist daher eine gut geeignete Größe zur Beschreibung von Sekundärströmungen (Marelius & Sinha 1998). Wird nachstehend von der „Stärke der Sekundärströmung“ gesprochen, ist die Größe des Drehimpulses gemeint.

## 2.2 Sekundärströmungen in Flusskurven

Im Folgenden wird schwerpunktmäßig auf die Ursache und die Wirkung krümmungsinduzierter Sekundärströmungen eingegangen. Da der Einsatz von Leitelementen und Lenkbuhnen in Krümmungen das Ziel verfolgt, die krümmungsinduzierte Sekundärströmung möglichst vollständig zu neutralisieren (z.B. Odgaard & Kennedy 1983, Odgaard & Mosconi 1987, Mende 2006), ist ein grundlegendes Verständnis ihrer Entstehung und Wirkung zur Zielerreichung wichtig. Darüber hinaus ist die Wirkung krümmungs- und bauwerksinduzierter Sekundärströmungen dem Grundsatz nach sehr ähnlich, weshalb ein verbessertes Prozessverständnis der sekundärströmungsgeprägten Kurvenströmung auch für das Verständnis der Wirkungsweise von Lenkbuhnen und Leitelementen hilfreich ist.

Auf die Entstehung der bauwerksinduzierten Sekundärströmungen und die mit ihnen verbundenen Auswirkungen hinsichtlich der Hydraulik und des Geschiebetransports wird dann ausführlicher im Kapitel 3 eingegangen.

### 2.2.1 Ursache

Krümmungsinduzierte Sekundärströmungen werden durch die unterschiedlich großen Zentrifugalkräfte verursacht, die auf die Wasserteilchen in einer Krümmung wirken (Rozovskii 1957). Da die Zentrifugalkraft  $F_z$  mit dem Quadrat der örtlichen Geschwindigkeit zunimmt (Gl. 2.6) und diese über die Tiefe nicht konstant ist, sondern meistens zur Sohle hin abnimmt, ist die Zentrifugalkraft in der Regel an der Wasseroberfläche am größten und an der Sohle am kleinsten (Abb. 2.3, Mitte).

$$F_z = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \text{Gl. 2.6}$$

mit:

$F_z$  = Zentrifugalkraft [N]

$r$  = Radius; hier: Krümmungsradius [m]

Die Wasserteilchen folgen der vom Krümmungsmittelpunkt weggerichteten Zentrifugalkraft, wodurch der Wasserspiegel am Außenufer ansteigt und am Innenufer absinkt. Der aus der schiefen Wasserspiegellage resultierende Druckunterschied führt zu einer in Richtung Krümmungsmittelpunkt wirkenden und über die Tiefe im Querschnitt konstanten Radialkraft (Abb. 2.3 links). Aus der Überlagerung von Radial- und Zentrifugalkraft (Abb. 2.3 rechts) resultiert eine Sekundärströmung (Scheuerlein 1984).

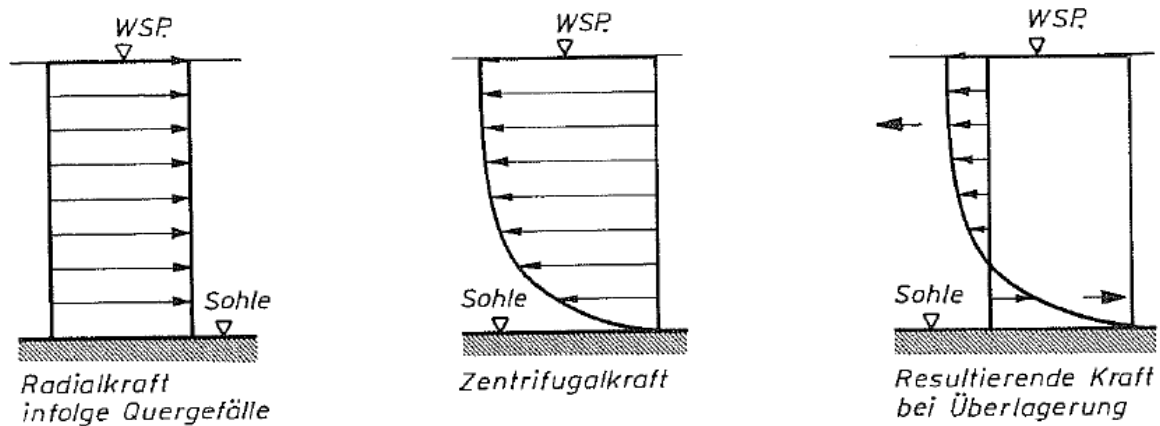


Abb. 2.3: Entstehung der Sekundärströmung in einer Krümmung (Scheuerlein 1984)

## 2.2.2 Wirkung

### 2.2.2.1 Änderung der Geschwindigkeitsverteilung der Hauptströmung

#### 2.2.2.2 Längsrichtung

Durch die Spiralströmung verändert sich im Verlauf der Krümmung die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt. Bei gleichmäßigem Querschnitt verlagert sich das Geschwindigkeitsmaximum der Hauptströmung am Krümmungsbeginn zunächst wasserspiegelnah von der Querschnittsmitte zum Innenufer (Abb. 2.4, Schnitte 1-1 und 2-2; Rozovskii 1957, Meckel 1978). Die am Krümmungsbeginn höhere Geschwindigkeit am Innenufer ist primär auf den kürzeren Fließweg und das daraus resultierende höhere Gefälle und sekundär auf die verringerte Fließtiefe in Folge der Wasserspiegelverkipfung zurückzuführen (Hafner 2008).

Im Verlauf der Krümmung führt die Sekundärströmung zu einer Umverteilung der Hauptströmung und verlagert das Geschwindigkeitsmaximum in Richtung Außenufer (Abb. 2.4, Schnitt 3-3; Hafner 2008). Diese Verlagerung verstärkt sich zum Ende der Krümmung, da sich die Wasserspiegelneigung verringert, die Wasserspiegellage am Außenufer absinkt und die Strömung beschleunigt (Abb. 2.4, Schnitt 4-4). Geht die Krümmung in einen geraden Gewässerabschnitt über, verlagert sich das Geschwindigkeitsmaximum mit der Zeit wieder in Richtung Gerinnemitte (de la Motte 2000).

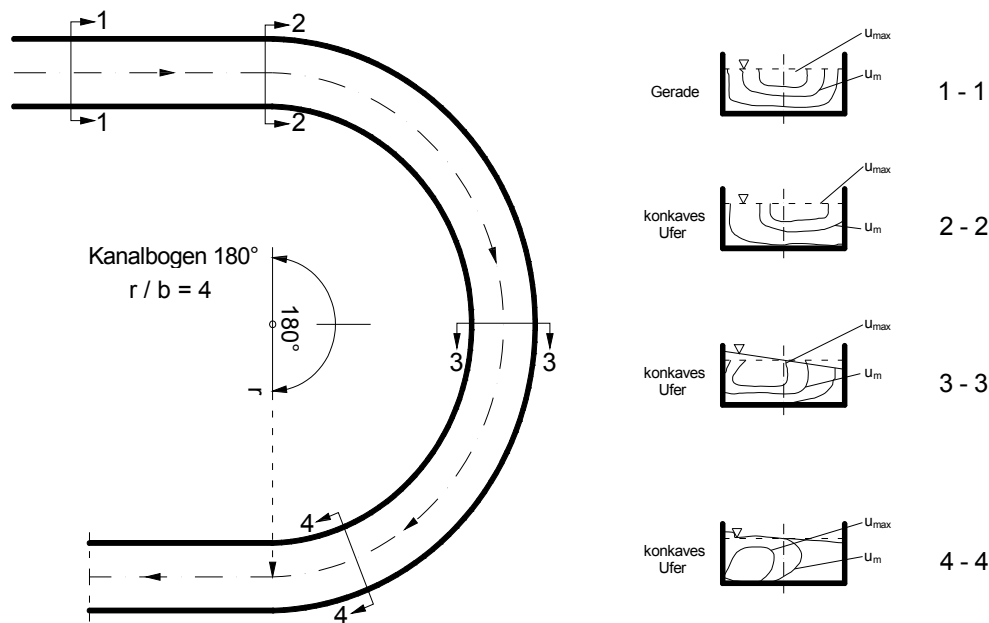


Abb. 2.4: Verteilung der Geschwindigkeit  $u$  entlang eines Kanalbogens in schematischer Iso-tachendarstellung (Meckel 1978, modifiziert)

### 2.2.2.3 Vertikalrichtung

Auch in vertikaler Richtung findet infolge der Spiralströmung eine Verschiebung des Geschwindigkeitsmaximums statt (Abb. 2.4). Das Maximum wandert in Fließrichtung vom oberflächennahen zum bodennahen Bereich (z.B. Rozovskii 1957, Meckel 1978, Bathurst et al. 1979). Die bei geraden Gerinnen über die Tiefe angenommene logarithmische Geschwindigkeitsverteilung ist zumindest im unteren Teil von Krümmungen folglich nicht vorhanden. Da die vertikale Geschwindigkeitsverteilung die auf die Wasserteilchen ausgeübte Fliehkraft ursächlich beeinflusst, muss damit auch die krümmungsinduzierte Sekundärströmung im Verlauf einer Kurve nachlassen oder sogar die Drehrichtung ändern (vgl. Abb. 2.3).

### 2.2.2.4 Einfluss auf die hydraulische Belastung

Die Änderung der Geschwindigkeitsverteilung der Hauptströmung durch die induzierte Sekundärströmung hat Einfluss auf die hydraulische Belastung der Ufer, die maßgeblich für die Ermittlung des Sicherungsbedarfs am zu sichernden Einbauort einer Ufersicherung ist. Die hydraulische Belastung, auch „Strömungsbelastung“ genannt (Schröder & Römisch 2001), wird in Form der Fließgeschwindigkeit oder der Schubspannung ausgedrückt (Gerstgraser 2000, Stowasser 2011). Sie kann, bezogen auf die Belastbarkeiten ingenieurbioologischer Bauweisen, in drei Kategorien unterteilt werden (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Kategorien des Parameters „hydraulische Belastung“ ingenieurbioologischer Bauweisen (Stowasser 2011)

Kategorien hydraulische Belastung	Fließgeschwindigkeit	Schubspannung
Stark	> 3.5 m/s	> 140 N/m <sup>2</sup>
Mittel	> 2.5 bis < 3.5 m/s	> 60 und < 140 N/m <sup>2</sup>
Schwach	1.5 bis 2.5 m/s	< 60 N/m <sup>2</sup>

Die hydraulische Belastung ist ungleichmäßig über die Profilberandung (Sohle und Ufer) verteilt. Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass z.B. die Sohlenschubspannung  $\tau_0$  in einem geradlinig verlaufenden Trapezgerinne in der Gerinnemitte etwa

$$\max \tau_{0,\text{Sohle}} = 0.970 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot I_E \quad \text{Gl. 2.7}$$

mit:

$\tau_0$  = Sohlenschubspannung [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$I_E$  = Energieliniengefälle [-]

und die größte Uferschubspannung, die i.d.R. etwa in Höhe von  $h/3$  über der Sohle auftritt (Abb. 2.5)

$$\max \tau_{0,\text{Ufer}} = 0.750 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot I_E \quad \text{Gl. 2.8}$$

beträgt (Schröder & Römisch 2001).

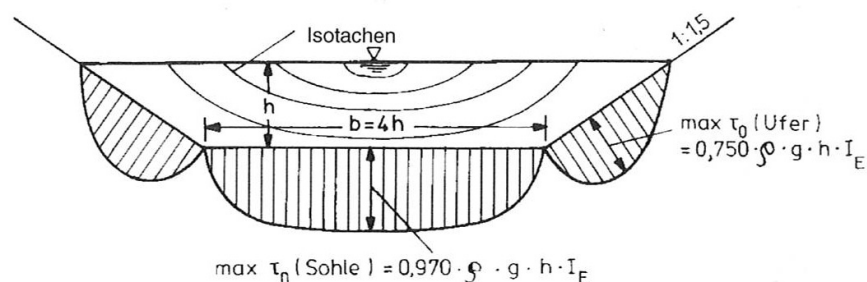


Abb. 2.5: Verteilung der Wandschubspannung über die Profilberandung eines ausgewählten Trapezprofils in einem geraden, regelmäßig geformten Fließgewässerabschnitt (Schröder & Römisch 2001, nach Chow 1959)

An Prallufeln nimmt  $\tau_{0,\text{Ufer}}$  durch die sekundärströmungsbedingte Änderung der Geschwindigkeitsverteilung zu. Dies kann durch einen auf Erfahrungswerten beruhenden Verstärkungskoeffizienten  $\epsilon$  berücksichtigt werden:

Tab. 2.2: Verstärkungskoeffizient  $\varepsilon$  in Abhängigkeit von der Lage im Gewässerverlauf (Schröder & Römisch 2001)

Lage im Gewässerverlauf	Verstärkungskoeffizient $\varepsilon$ [ - ]
gerade Strecke	1.00
leichtes Prallufer	1.10
mittleres Prallufer	1.35
starkes Prallufer	1.70

Die maßgebende Uferschubspannung am Prallufer ist damit:

$$\max \tau_{0,Ufer} = 0.75 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot l_E \quad \text{Gl. 2.9}$$

Nach Johannsen & Burmeister (2008) kann mit Hilfe des Verstärkungskoeffizienten  $\varepsilon$  auch die ufernahe Fließgeschwindigkeit am Prallufer abgeschätzt werden. Es gilt

$$u_{Ufer} = \varepsilon \cdot u_m \quad \text{Gl. 2.10}$$

mit:

$u_{Ufer}$  = ufernahe Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]

$u_m$  = querschnittsgemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]

Beim Überströmen eines Uferelements (z.B. eines Kieskorns) wirkt auf das Element eine Widerstandskraft  $F_\tau$  (Hansen 1985):

$$F_\tau = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho \cdot A_D \cdot u^2 \quad \text{Gl. 2.11}$$

mit:

$F_\tau$  = Widerstandskraft [N]

$c_W$  = Formwiderstandsbeiwert des Uferelements [-]

$A_D$  = angeströmte Fläche je Flächeneinheit [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]

$u$  = lokale Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]

Die Fließgeschwindigkeit geht in die Berechnung der Widerstandskraft (Gl. 2.11) zum Quadrat ein, daher entspricht bereits eine Zunahme der Geschwindigkeit um 41.4% einer Verdopplung und eine Verringerung um 29.3% einer Halbierung der auf das Uferelement wirkenden Kraft.

Die Ausbildung des Prallufers und die daraus resultierenden Änderungen der Schubspannungs- und Geschwindigkeitsverteilung haben damit ausgesprochen großen Einfluss auf die

Uferbelastung. In einem starken Prallufer kann es zu einer Zunahme der Uferschubspannung um bis zu 70% (Tab. 2.2) kommen. Gleiches gilt nach Johannsen & Burmeister (2008) auch für die ufernahe Fließgeschwindigkeit, woraus bei der Widerstandskraft (Gl. 2.11) sogar eine Zunahme um bis zu 189% gegenüber einem geraden Gewässerabschnitt resultiert. Wird die kurveninduzierte Sekundärströmung mit Hilfe von Leitelementen oder Lenkbuhnen neutralisiert, kann die Belastung auf die einer geraden Strecke reduziert werden. Wird die Drehrichtung der kurveninduzierten Sekundärströmung durch die Einbauten umgekehrt, ist vermutlich eine noch größere Reduktion möglich. Durch die Verringerung der Belastung wird vielfach der vollständige Verzicht auf einen Längsverbau als Ufersicherung möglich oder es können ingenieurbioökologische und damit naturnahe Bauweisen anstelle von "harten" Ufersicherungen verwendet werden.

#### **2.2.2.5 Morphologie**

Die Inhomogenität der Fließgeschwindigkeiten infolge von Sekundärströmungen hat großen Einfluss auf den lokalen Geschiebetransport eines Gerinnes und damit auf seine Längs- und Querprofilgeometrie. Die vertikale und horizontale Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums führt örtlich zur Vergrößerung der Sohlschubspannung (Kapitel 2.2.2.4) und wird daher für den vermehrten Geschiebetransport in Krümmungen verantwortlich gemacht. Die Richtung des Transports zum Innenufer hin ergibt sich dabei anhand der Resultierenden der Schubspannungskomponenten über der Gerinnesohle (Bathurst et al. 1979).

Die sohlennahe Querströmung bestimmt folglich die Transportrichtung und verursacht in Kombination mit der Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums Ablagerungen am Innenufer und die Ausbildung des Kurvenkolks am Außenufer. Es entsteht ein Sohlenquergefälle, das den Abfluss zusätzlich am Prallufer konzentriert.

Die Abflusskonzentration führt am Prallufer zu einer verstärkten direkten Strömungserosion. Die direkte Strömungserosion beinhaltet Erosionsprozesse, die auf die Strömung bzw. die Schubspannungsgeschwindigkeit zurückzuführen sind (Requena 2008). Sie tritt vorwiegend im unteren Böschungsbereich auf, da hier die größten Schubspannungsgeschwindigkeiten herrschen. Durch die Erosion des Böschungsfußes steigt die Böschungsneigung, wodurch der oberhalb liegende Böschungsbereich instabil wird. Es resultieren Massenbewegungen wie Gleitbrüche und Rutschungen, bei denen sich das gelöste Material am Böschungsfuß sammelt und durch die Strömung abtransportiert wird (Scherle 1999). Diese Massenbewegungen treten an Prallufern aufgrund der erhöhten hydraulischen Belastung (Kapitel 2.2.2.4) verstärkt auf. In der Folge treten in Krümmungen jährliche Laufverlagerungen von bis zu mehreren hundert Metern auf (ASCE 1965, Zeller 1967).

### **2.3 Analytik der Sekundärströmungen in Krümmungen**

Bei der Analytik von Strömungen in Krümmungen wird in der Regel auf die Kurvenkoordinaten  $s$ ,  $n$  und  $z$  zurückgegriffen. Diese Koordinaten ermöglichen eine einfache Unterscheidung der Primär- oder Hauptströmung entlang der Flussachse von den senkrecht dazu verlaufenden Sekundärströmungen (Abb. 2.6, Malcherek 1999).



Dabei ist:

- s = horizontale Kurvenkoordinate, in Fließrichtung orientiert [m]
- n = horizontale Kurvenkoordinate, lateral zur Fließrichtung orientiert [m] [m]
- z = Koordinate, vertikal zur Fließrichtung orientiert [m]

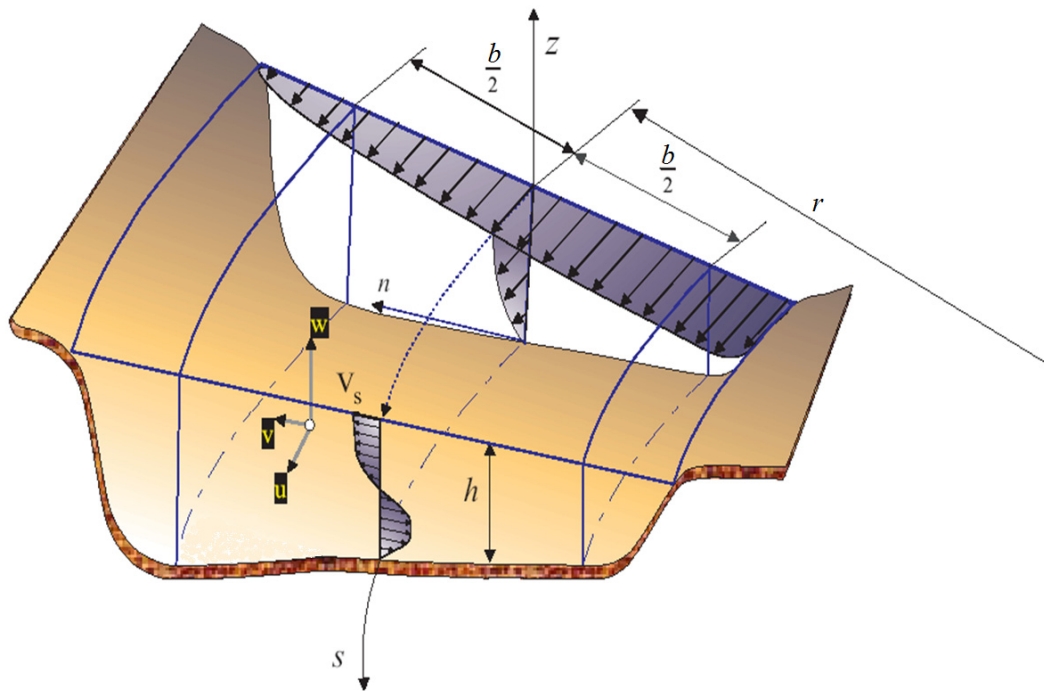


Abb. 2.6: Strömungsverteilung am Beginn einer Krümmung (Malcherek 1999, modifiziert)

### 2.3.1 Sekundärströmung entlang einer Bahnlinie

Die Änderung einer beliebigen physikalischen Größe  $f$  entlang einer Bahnlinie kann mit  $df/dt$  beschrieben werden. Diese Ableitung über die Zeit wird „Lagrangesche Ableitung“ genannt. Bei der Lagrangeschen Ableitung ändert sich der Beobachtungsort des Betrachters mit dem sich bewegenden Fluidpartikel, daher ist  $f = f(t, x(t), y(t), z(t))$  (Malcherek 1999) bzw. in Kurven  $f = f(t, s(t), n(t), z(t))$ . Diese Betrachtungsweise ist zur im Folgenden beschriebenen Analyse der Sekundärströmung entlang einer Bahnlinie sehr hilfreich.

Folgt auf eine geradlinige Strecke eine Krümmung, so muss sich die Sekundärströmung zunächst entwickeln. Die Sekundärströmung verändert sich daher im Verlauf der Krümmung. Ihre Änderung entlang einer Bahnlinie kann unter den vereinfachenden Annahmen

- einer gegenüber dem mittleren Krümmungsradius  $r_m$  geringen mittleren Sohlenbreite, d.h.  $b_m / r_m \approx 0$
- einer hydrostatischen Druckverteilung
- vernachlässigbarer horizontaler Schubspannungen

mit Hilfe der Gleichung der Sekundärströmungen berechnet werden (Malcherek 1999):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{u^2}{r} - g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \text{Gl. 2.12}$$

mit:

$t$  = Zeit [s]

$z_s$  = Koordinate  $z$  an der Wasseroberfläche [m]

$v_t$  = turbulente Viskosität

In Gl. 2.12 werden die Zentrifugalkraft  $u^2/r$ , das laterale Wasseroberflächengefälle  $g \cdot \partial z_s / \partial n$  und das vertikale Geschwindigkeitsprofil der Sekundärströmung  $\partial / \partial z \cdot (v_t \partial v / \partial z)$  berücksichtigt.

Bei ausreichend langen Kurven wird von der Ausbildung einer „vollentwickelten Sekundärströmung“ ausgegangen, d.h. die Querströmung verändert sich entlang ihrer Bahn nicht mehr, da antreibende und dämpfende Kräfte im Gleichgewicht sind (Malcherek 1999):

$$0 = \frac{u^2}{r} - g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \text{Gl. 2.13}$$

Dieser Zustand wird jedoch in der Natur nur sehr selten erreicht.

### 2.3.2 Querneigung des Wasserspiegels

Die Querneigung des Wasserspiegels infolge der Zentrifugalkraft (Kapitel 2.2.1) kann nach Malcherek (1999) durch Gleichsetzen des Oberflächen- und des Zentrifugalterms abgeschätzt werden:

$$g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial n} = \alpha' \cdot \frac{\tilde{u}^2}{r} \quad \text{Gl. 2.14}$$

mit:

$\alpha'$  = Korrekturkoeffizient [ - ]

$\tilde{u}$  = über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung [m/s]

Der Korrekturkoeffizient  $\alpha'$  dient der Kompensation vernachlässigter Terme und liegt zwischen 0.75 und 1.0.

### 2.3.3 Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche

Die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche wird im Nachfolgenden hergeleitet. Dafür wird zunächst ein linearer Ansatz für die Quergeschwindigkeit  $v$  über die Tiefe  $z$  verwendet (Rozowskii 1957):

$$v(z) = \tilde{v} + v_s \cdot \left( \frac{2 \cdot z}{h} - 1 \right) \quad \text{Gl. 2.15}$$

mit:

$v_s$  = Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche [m/s] (Abb. 2.6)

$\tilde{v}$  = tiefengemittelte Quergeschwindigkeit, aus Kontinuitätsgründen gilt  $\tilde{v} = 0$

Für die Quergeschwindigkeit an der Sohle  $v_0$  gilt bei dem linearen Ansatz:

$$v_0 = -v_s \quad \text{Gl. 2.16}$$

Die turbulente Viskosität wird über einen parabolischen Ansatz berechnet (Malcherek 1999):

$$v_t = \kappa \cdot u_* \cdot z \cdot \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \quad \text{Gl. 2.17}$$

mit:

$\kappa$  = von Kármán-Konstante, i.d.R.  $\kappa = 0.4$

$u_*$  = (Sohlen-) Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]

Durch die zweifache Ableitung des Terms für das vertikale Geschwindigkeitsprofil der Sekundärströmung aus Gl. 2.12 nach  $\partial z$  ergibt sich (Malcherek 1999):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{u^2}{r} - g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial n} + \frac{2 \cdot \kappa \cdot v_s \cdot u_*}{h} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{h} \right) \quad \text{Gl. 2.18}$$

Ist die Querströmungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche bekannt, lässt sich das lineare Sekundärströmungsprofil damit vollständig ermitteln.

Odgaard (1989) vereinfachte in seiner Mäandertheorie das logarithmische Geschwindigkeitsprofil in Hauptfließrichtung näherungsweise durch ein einfach handhabbares Potenzgesetz mit dem Widerstandsparameter  $m_o$ :

$$u(z) = \tilde{u} \cdot \frac{m_o + 1}{m_o} \cdot \left( \frac{z}{h} \right)^{1/m_o} \quad \text{Gl. 2.19}$$

wobei

$$m_o = \kappa \cdot \frac{\tilde{u}}{u_*} = \kappa \cdot \sqrt{8/\lambda} = \frac{\kappa \cdot C}{\sqrt{g}} = \frac{1.131}{\sqrt{\lambda}} \quad \text{Gl. 2.20}$$

mit:

$m_o$  = Widerstandsparameter [ - ]

$\lambda$  = Darcy-Weisbach-Widerstandsbeiwert [ - ]

$C$  = Chezy-Beiwert [ $m^{1/2}/s$ ]

Mit dem Potenzgesetz ergibt sich für die Differentialgleichung der Sekundärströmungen an der freien Oberfläche (Malcherek 1999):

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{\tilde{u}^2}{r} \cdot \frac{m_o^2 + 2 \cdot m_o + 1}{m_o^2} - g \cdot \frac{\partial z_s}{\partial n} - \frac{2 \cdot \kappa^2 \cdot \tilde{u} \cdot v_s}{m_o \cdot h} \quad \text{Gl. 2.21}$$

Zur analytischen Lösung der Gleichung wird die transversale Wasserspiegelneigung infolge Zentrifugalbeschleunigung (Gl. 2.14) mit  $\alpha' = 1$  eingesetzt:

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{\tilde{u}^2}{r} \cdot \frac{2 \cdot m_o + 1}{m_o^2} - \frac{2 \cdot \kappa^2 \cdot \tilde{u} \cdot v_s}{m_o \cdot h} \quad \text{Gl. 2.22}$$

Bei voll entwickelter Sekundärströmung ( $dv_s/dt = 0$ ) ergibt sich dann für die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche (Rozovskii 1957):

$$v_s = \alpha_v \cdot \frac{\tilde{u} \cdot h}{r} \quad \text{Gl. 2.23}$$

mit:

$$\alpha_v = \text{Sekundärströmungskoeffizient [ - ]}$$

Der Sekundärströmungskoeffizient  $\alpha_v$  ist im Wesentlichen eine Funktion der Sohlenrauheit (Malcherek 1999) und ergibt sich für die voll entwickelte Sekundärströmung durch das Einsetzen von Gl. 2.23 in Gl. 2.22.

$$\alpha_v = \frac{2 \cdot m_o + 1}{2 \cdot \kappa^2 \cdot m_o} \quad \text{Gl. 2.24}$$

Damit folgt weiterhin für die Quergeschwindigkeit  $v_s$  an der Wasseroberfläche:

$$v_s = \frac{\tilde{u} \cdot (2 \cdot m_o + 1) \cdot h}{r \cdot m_o \cdot 2 \cdot \kappa^2} \quad \text{Gl. 2.25}$$

Für nichtlineare Quergeschwindigkeitsprofile werden in der Literatur (z.B. Englund 1974, Kikkawa et al. 1976) andere Sekundärströmungskoeffizienten angenommen.

Da das Verhältnis von Wassertiefe  $h$  zu Krümmungsradius  $r$  in der Regel sehr klein ist, ist die Quergeschwindigkeit gemäß Malcherek (1999) an der Wasseroberfläche etwa eine Zehnerpotenz kleiner als die Längsgeschwindigkeit. Diese Aussage wird durch Hafner (2008) bestätigt, nach seinen Berechnungen für voralpine Flüsse beträgt die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche etwa 1 bis 10% der Längsgeschwindigkeit.

### 3 Sekundärströmungsinduzierende Uferschutzbauweisen

#### 3.1 Definitionen und Wirkungsweise

##### 3.1.1 Leitelement

Leitelemente (engl. *Submerged Vanes, Iowa Vanes*) sind strömungslenkende vertikale Platten, mit denen die sohnnahen Strömungsverhältnisse und dadurch die Geschwindigkeitsverteilung und der Geschiebetransport innerhalb eines Gewässerquerschnitts beeinflusst werden. Sie werden in einem kleinen Winkel quer zur Strömung in die Gewässersohle eingebaut (Abb. 3.1). Ihre Wirkung basiert auf der Induzierung einer Sekundärströmung, in deren Einflussbereich sich die Stärke und Richtung der Sohlenschubspannung, die Geschwindigkeitsverteilung, die lokale Fließtiefe und der Geschiebetransport ändern. Hieraus resultieren in einem Teil des Querprofils Auflandungen, in anderen Eintiefungen (Odgaard & Wang 1991, Odgaard 2009; Abb. 3.2).

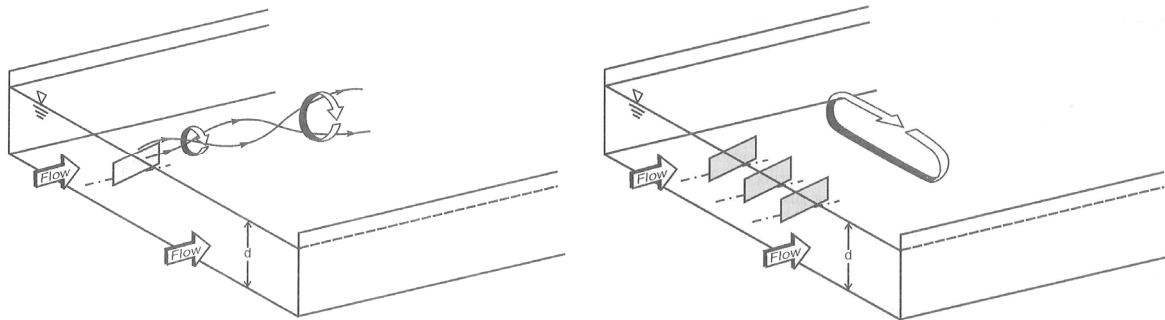


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des durch ein einzelnes Leitelement und eine Dreiergruppe der Elemente hervorgerufenen Strömungsbildes (Odgaard 2009).

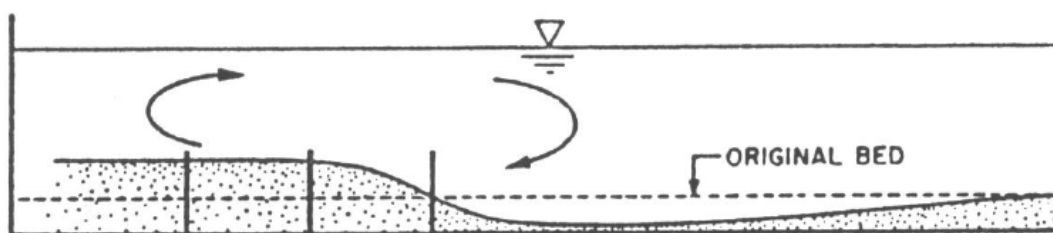


Abb. 3.2: Durch eine Dreiergruppe Leitelemente hervorgerufene Sedimentumlagerung (Odgaard & Wang 1991)

##### 3.1.2 Lenkbuhne

Der Begriff Lenkbuhne wurde in Sindelar & Mende (2009) definiert: „Die Lenkbuhne ist eine Buhnenbauweise, die bereits bei Niedrigwasserabfluss vollständig überströmt wird. Als wesentliches Merkmal induziert sie bei größeren Abflüssen eine Spiralströmung um die Längsachse in Fließrichtung und beeinflusst damit die Geschwindigkeitsverteilung und den Geschiebetransport“ (Abb. 3.3).

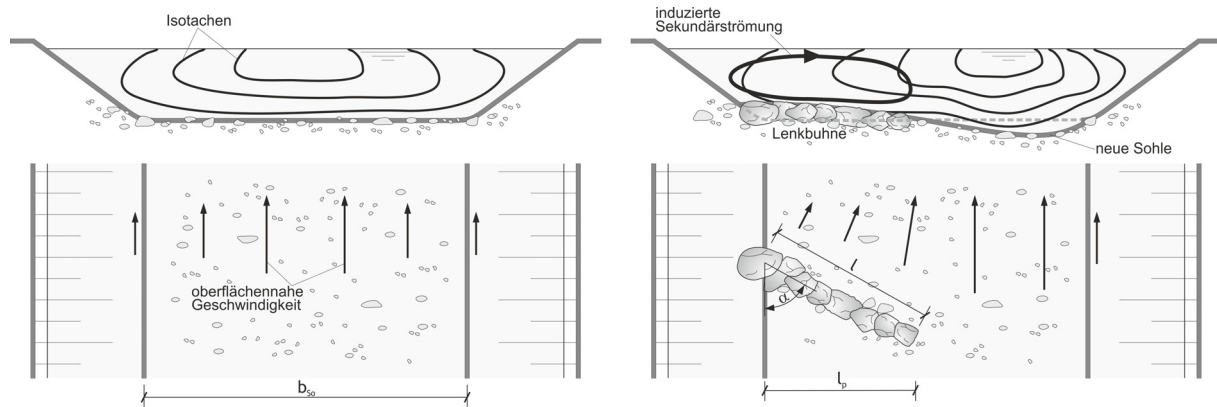


Abb. 3.3: Schematische Isotachendarstellung einer geraden Gewässerstrecke ohne (links) und mit Lenkbuhnen (rechts; Sindelar & Mende 2009, modifiziert)

Leitelemente und Lenkbuhnen unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre konstruktive Gestaltung. Hinsichtlich der Wirkungsweise bestehen dagegen große Ähnlichkeiten.

## 3.2 Typische Anordnung und Geometrie

### 3.2.1 Leitelemente

Leitelemente werden direkt in die Gewässersohle eingebaut. Zur Verstärkung des durch sie beeinflussten Bereichs werden sie üblicherweise in Gruppen angeordnet (z.B. Abb. 3.1 und Abb. 3.4). Typische Anordnungen und Geometrien wurden in Odgaard & Wang (1991) zusammengestellt:

- Inklinationswinkel  $\alpha = 15$  bis  $30^\circ$  (Abb. 3.4): Leitelemente werden „inklinant“ angeordnet, d.h.  $\alpha < 90^\circ$ . Anordnungen mit  $\alpha > 90^\circ$  werden als „deklinant“ bezeichnet.
- Höhe der Elemente  $h_B = 0.2$  bis  $0.4 h$
- Überströmungshöhe bei Bemessungsabfluss  $T$  [m]
- Länge der Elemente  $l = 2$  bis  $3 h_B$
- Abstand der Leitelemente in Fließrichtung  $a_x = 15$  bis  $30 h_B$
- Lateraler Abstand der Leitelemente  $a_y = 2$  bis  $3 h_B$
- Lateraler Abstand der Leitelemente zum Ufer  $a_{y,u} < 4 h_B$

Detaillierte Bemessungsansätze zur Festlegung der genauen Anordnung und Geometrie, die sich nach dem Anwendungsgebiet und den lokalen Verhältnissen richten, sind in Odgaard & Wang (1991) und Odgaard (2009) zu finden.

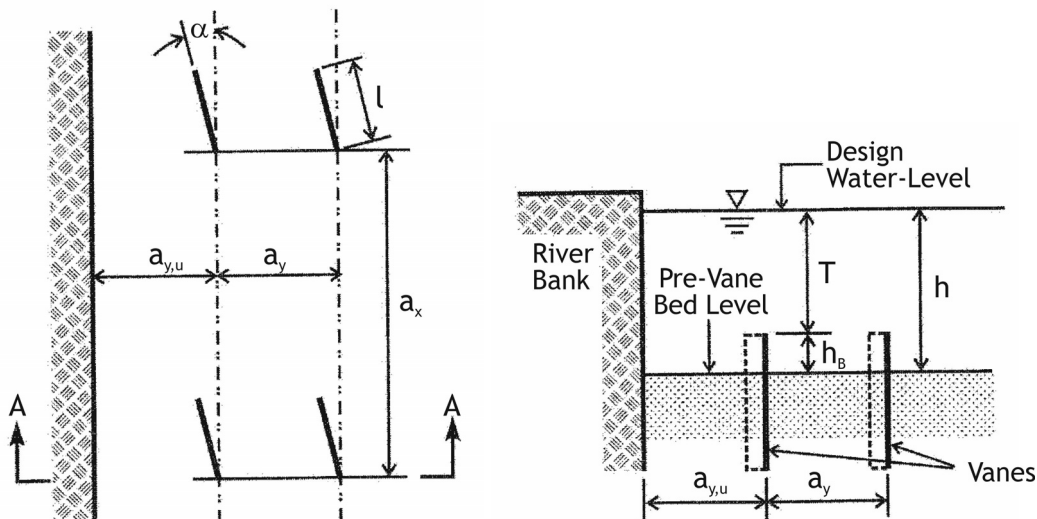


Abb. 3.4: Bemessungsgrößen von Leitelementen; Situation (links; Fließrichtung von unten nach oben); Schnitt A-A (rechts; Odgaard 2009, modifiziert)

### 3.2.2 Lenkbuhnen

Angaben zur Anordnung und Geometrie von Lenkbuhnen in Flusskurven und geraden Abschnitten wurden, basierend auf den Erfahrungen bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur und eigenen Erfahrungen, in Werdenberg et al. (2012a, b) publiziert. Sie beziehen sich auf eine Baumaßnahme an der Taverna / Kanton Freiburg (Bemessungsabfluss  $Q_b = HQ_{100} = 38 \text{ m}^3/\text{s}$ , Sohlgefälle  $I_0 = 1.0$  bis  $1.6\%$ , Sohlenschubspannung im Bemessungsfall  $\tau_0 \leq 200 \text{ N/m}^2$ ), die zwischen Frühjahr 2011 und Frühjahr 2012 auf dem Gebiet der Gemeinde Wünnewil-Flamatt zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit umgestaltet wurde. Die Ufer werden an der Taverna ausschließlich durch Lenkbuhnen gesichert, auf eine zusätzliche ingenieurbioologische Sicherung oder gar einen harten Längsverbau wurde abgesehen von Zwangspunkten wie z.B. Brücken vollständig verzichtet. Seit dem Einbau der Lenkbuhnen sind bereits zwei etwa 30-jährliche Hochwasser aufgetreten, bei denen keinerlei Schäden entstanden (Mitteilung N. Werdenberg per E-Mail vom 21.5.13). Gewisse Grundsätze zur Anordnung und Geometrie können darüber hinaus auch aus den Plandarstellungen in Grober (1998) abgeleitet werden.

#### 3.2.2.1 Krümmungen

Werdenberg et al. (2012a, b) ordneten die Lenkbuhnen an der Taverna, wie auch in Grober (1998) dargestellt (Abb. 3.17), in Gruppen an. Als Inklinationwinkel  $\alpha$  (Abb. 3.3 rechts) wurde  $60^\circ$  gewählt. Ebenso wie Leitelemente wurden die Lenkbuhnen inklinant angeordnet (s.a. Kapitel 3.2.1). Die Festlegung des Buhnenabstands  $a_x$ , der als der Abstand zwischen benachbarten Buhnenwurzeln definiert ist, richtete sich nach der Stärke der Flusskrümmung, also dem Verhältnis von Kurvenradius  $r$  zu Sohlenbreite  $b_{S0}$ :

- Enge Kurve ( $r < 3 b_{S0}$ ):  $a_x = 0.8 \text{ bis } 1.0 b_{S0}$
- Weite Kurve ( $r > 8 b_{S0}$ ):  $a_x = 1.8 \text{ bis } 2.0 b_{S0}$
- Mittlere Kurve ( $3 b_{S0} < r < 8 b_{S0}$ ):  $a_x = 1.5 b_{S0}$

Die Abstände wurden jeweils leicht variiert, „damit kein starrer Takt entsteht“ (Werdenberg et al. 2012b), also ein möglichst naturnahes Erscheinungsbild erreicht wird.

Die Lenkbuhnen reichten in der Regel nicht über die Gewässermitte hinaus. Die auf die Gewässerbreite projizierte Länge  $l_p$  (Abb. 3.3 rechts) betrug damit etwa  $0.5 b_{so}$ . Für das in Grober (1998) dargestellte Lenkbuhnensystem (Abb. 3.17) ergibt sich  $l_p \approx 2/3 b_{so}$ .

In der Literatur zu Uferschutz- und Regelungsbuhnen (s. a. Kapitel 3.7) wird als Dimensionierungsgröße häufig der relative Abstand  $A_B$  angegeben:

$$A_B = \frac{a_x}{l_p} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Berechnet man  $A_B$  für die Lenkbuhnen an der Taverna, ergeben sich in Abhängigkeit vom Verhältnis Radius zu Sohlenbreite folgende Werte:

- Enge Kurve ( $r < 3 b_{so}$ ):  $A_B = 1.6$  bis  $2.0$
- Weite Kurve ( $r > 8 b_{so}$ ):  $A_B = 3.6$  bis  $4.0$
- Mittlere Kurve ( $3 b_{so} < r < 8 b_{so}$ ):  $A_B = 3.0$

Die Höhe  $h_B$  der Lenkbuhnen über der mittleren Sohlenlage betrug  $0.1$  bis  $0.2$  m, als mittlere Fließtiefe im Bemessungsfall  $h_b$  wurden  $1.2$  bis  $1.5$  m berechnet (Werdenberg et al. 2012b).

Zur Charakterisierung der Überströmung ist die relative Bauwerkshöhe, also das Verhältnis von mittlerer Bauwerkshöhe zur mittleren Fließtiefe, eine geeignete dimensionslose Größe (Gl. 3.2):

$$H = \frac{h_{B,m}}{h_m} \quad \text{Gl. 3.2}$$

mit:

$H$  = relative Höhe [ - ]

$h_{B,m}$  = mittlere Bauwerkshöhe; Bezugsniveau: mittlere Sohlenlage [m]

$h_m$  = mittlere Fließtiefe [m]

Beim Bemessungsabfluss  $Q_b$  gilt:

$$H_b = \frac{h_{B,m}}{h_b} \quad \text{Gl. 3.3}$$

mit:

$H_b$  = relative Höhe bei  $Q_b$  [ - ]

$h_b$  = mittlere Fließtiefe bei  $Q_b$  [m]



Für die Lenkbuhnen in der Taverna ergibt sich im Bemessungsfall eine relative Höhe  $H_b$  von ca. 1/10 bis 1/9. Sie ist damit wesentlich niedriger als die von Leitelementen, deren Höhe etwa 1/5 bis 2/5 der lokalen Fließtiefe entspricht (Kapitel 3.2.1). Geht man von einer über die Breite ebenen Sohle und damit einheitlichen Fließtiefen aus, ist die relative Höhe von Leitelementen etwa doppelt bis viermal so groß wie die von Lenkbuhnen.

### 3.2.2.2 Gerade Strecken

Der Uferschutz in der Taverna wurde auch in einem geraden Gewässerabschnitt der Taverna mit Lenkbuhnen sichergestellt. Die Buhnen wurden als inklinante sogenannte „Strömungstrichter“ (Grober 1998; Abb. 3.5b, s. a. Kapitel 3.6.3) angeordnet, wobei der mittlere Abstand die 3fache Sohlenbreite (min 1.5fach, max. 4fach) betrug (Werdenberg et al. 2012a).

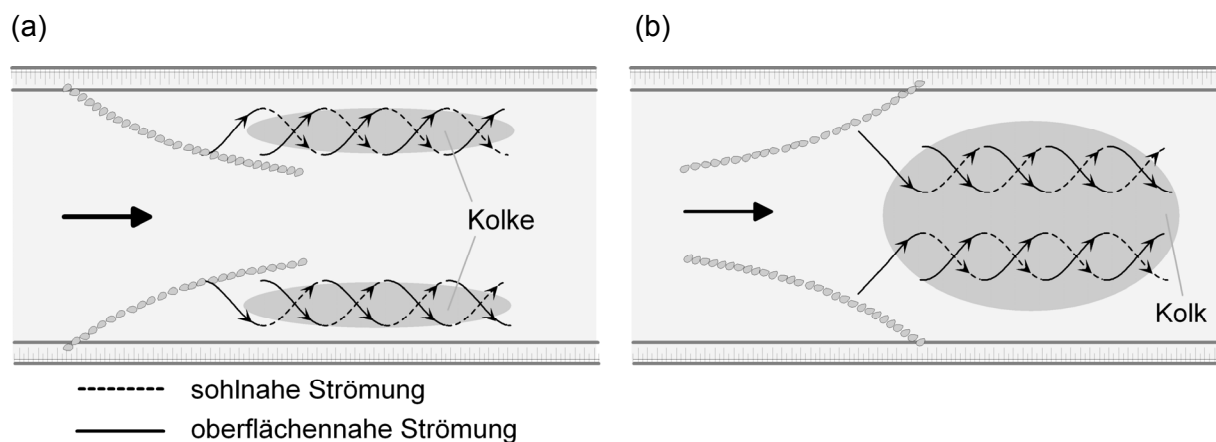


Abb. 3.5: Vereinfacht dargestellte Hydraulik und Sohlenmorphologie bei Strömungstrichtern: a) deklinante und b) inklinante Anordnung (Sindelar & Mende 2009)

Eine Aussage zur Länge der Trichterbuhnen wird nicht gemacht. Nach Auskunft von Otmar Grober (mündl. Mitteilung im Januar 2011) hat sich in seiner Praxis jedoch zur Festlegung der Länge das „Drittelpinzip“ bewährt. Die Lenkbuhnen werden so dimensioniert, dass etwa ein Drittel der Sohlenbreite unverbaut bleibt. Die beiden Lenkbuhnen werden in der Summe folglich über etwa 2/3 der Sohlenbreite eingebaut. Unter der Annahme, dass die Lenkbuhnen an der Taverna ebenfalls nach dem Drittelpinzip eingebaut wurden, liegt der relative Abstand bei dem gewählten Abstand (3fache Sohlenbreite, s.o.) bei  $A_B = 9$ .

## 3.3 Historie

Die auch heute noch wenig bekannte Methode zur Anpassung der Geschwindigkeitsverteilung und des Geschiebemanagements durch sekundärströmungsreduzierende Bauweisen ist keineswegs neu. Bereits im Jahr 1933 wurde an den Österreicher Viktor Schaubberger ein Patent für „leitschaukelartige Flächen“ (Abb. 3.6) erteilt, die bereits große Ähnlichkeit mit Leitelementen aufweisen. Er setzte sie zur Vermeidung von Ablagerungen in der Gewässermitte ein, indem er mit ihnen eine „voreilende Bewegung des Wassers im Kern gegenüber der Wasserführung in den Randzonen“ (Österreichisches Patentamt 1933) bewirkte.

Erst in den 1980er Jahren wurde die Methode der Sekundärströmungsinduzierung verstärkt in der wissenschaftlichen Forschung aufgegriffen. Am Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) wurde unter Leitung von Professor Jacob Odgaard mit den Leitelementen eine meist als vertikale Platte ausgebildete Bauweise entwickelt und erforscht, die große Ähnlichkeit mit den Einbauten von Schauburger besitzt und wie sie Sekundärströmungen induziert (siehe auch Kapitel 1.1 und 3.5). Spätere Versuche zu Leitelementen fanden vor allem im Rahmen des BUET-DUT Linkage Project statt, einer Kooperation der Delft University of Technology und der Bangladesh University of Engineering and Technology (z.B. Flokstra et al. 1998, van Zwol 2004, Flokstra 2006).

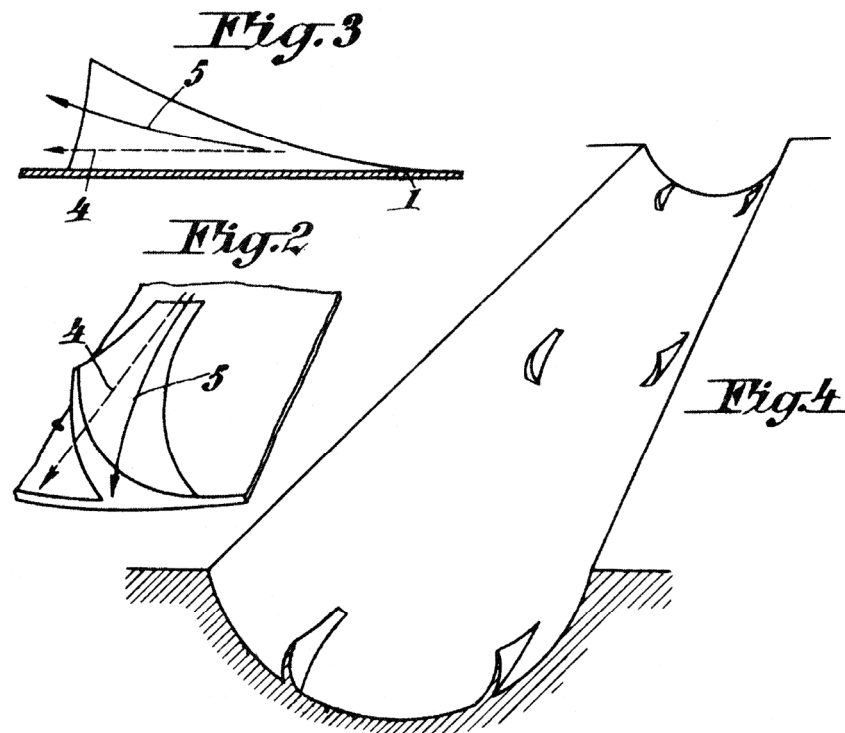


Abb. 3.6: Darstellung von „leitschaufelartigen Flächen“ zur Vermeidung von Ablagerungen (Österreichisches Patentamt 1933)

Erste Versuche, mit buhnenähnlichen Strukturen Sekundärströmungen zu induzieren, erfolgten in den 1950er Jahren bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe (Gehrig 1958). Im physikalischen Modell der Rheinstrecke Düsseldorf wurde überprüft, ob durch in Kurvenkolken inklinant angeordnete Grundswellen ein wirksamer Kolkverbau erreicht werden kann. Durch ihre „schräge Lage zum Stromstrich“ sollten die Schwellen „das am Innenufer vorbeiziehende Geschiebe aus den Bänken und auf der Rückseite der Schwellen in einer Sekundärströmung zum Außenufer – also in den Kolk – verlagern“ (Gehrig 1958). Mit dem Begriff „Sekundärströmung“ ist in diesem Falle eine „Grundwalze“ gemeint, die das Geschiebe „nach der Art einer Förderschnecke“ zum Außenufer transportiert (Abb. 3.7). Es ist davon auszugehen, dass durch die Grundwalze, die eine sohlennahe Querströmung hervorruft, bei starker Überströmung der Grundschwelle (d.h. lokale Fließtiefe  $h > 2$ fache Schwell-

lenkhöhe  $h_B$ ) eine wie bei Lenkbuhnen am Außenufer bzw. Lenkbuhnenfuß aufsteigende Sekundärströmung entsteht und die Grundschwelle damit per Definition eine Lenkbuhne ist.

Der Geschiebetransport in der „Förderschnecke“ entlang der Grundswellen konnte im Modell gut beobachtet werden. Ihre Leistung war jedoch nur gering, so dass die Grundswellenfelder nicht wesentlich verlandeten (Gehrig 1958). Aus heutiger Sicht kann davon ausgegangen werden, dass die wesentliche Ursache für die nicht zufriedenstellende Wirkung in der geringen Böschungsneigung der strömungsabgewandten Leeseite zu finden ist. Die Entwicklung größerer Grundwalzen, die für die Wirkung ausschlaggebend sind, wurde durch flache Neigungen gezielt verhindert (vgl. Abb. 3.8). Durch die Grundwalzen wurde ein Aufwirbeln des Geschiebes in den Grundswellenfeldern und eine Kolkbildung unterhalb der Schwellen befürchtet, die die Standsicherheit der Schwelle gefährdet. Damit sich die Strömung nicht ablöst und somit die Entstehung einer Grundwalze vermieden wird, wurde die Böschungsneigung der Leeseite mit 1:7 bis 1:6 sehr flach ausgebildet (Gehrig 1958). Aus den flachen Neigungen resultierte jedoch ein großer Baumaterialbedarf und damit hohe Kosten, was neben der nur mäßigen Wirkung ein weiterer Grund war, weshalb die Idee der inklinanten Grundswellen nicht weiter verfolgt wurde.

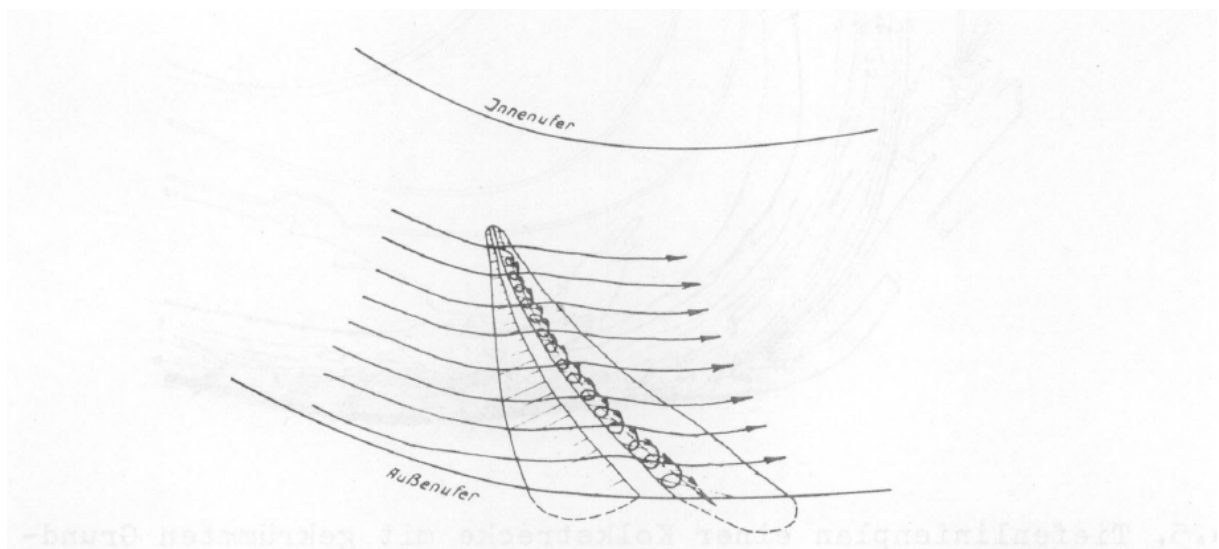


Abb. 3.7: Grundwalze entlang einer inklinant angeordneten Grundschwelle (Gehrig 1958)

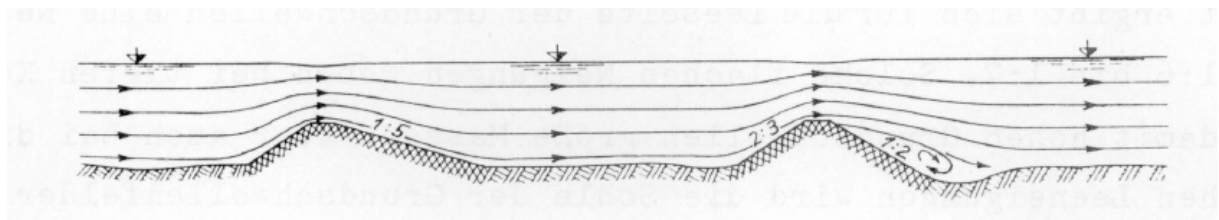


Abb. 3.8: Strömungsverlauf über Grundswellen in Abhängigkeit von den Neigungen der Luv- und Leeseiten (Gehrig 1958)

Die Anfang der 1990er Jahre von Otmar Grober (Baubezirksleitung Bruck an der Mur / Steiermark) erstmals in der flussbaulichen Praxis umgesetzte „Lenkbuhne“ stellt eine naturnahe Bauweise des Instream River Training dar. Sie wurde unabhängig von der Forschungstätigkeit bei der BAW und am IIHR entwickelt und wird in der Steiermark je nach Anordnung und Geometrie als „Sohlgrundbuhne“, „Sichelbuhne“, „Wasserschnecke“ oder „Strömungstrichter“

bezeichnet (Grober 1998). Im Gegensatz zu den flach geneigten, meist aus Steinschüttungen bestehenden Grundswellen werden Lenkbuhnen bei der Baubezirksleitung aus unbearbeiteten, möglichst kubischen Blocksteinen gebaut, die jeweils einzeln gesetzt werden (s.a. Kapitel 3.5). Ihre Leeseite ist damit verhältnismäßig steil, woraus eine starke Strömungsablösung und damit eine Grundwalze resultieren. Wie die Praxiserfahrung zeigt, ist damit jedoch kein Austrag von Geschiebe aus den Lenkbuhnenfeldern verbunden, wie es bei den Grundswellen befürchtet wurde. Die Bildung bauwerksnaher Kolke, die insbesondere am Kopf auftreten und u.a. als Fischeinstände dienen, wird aus ökologischen Gründen bewusst zugelassen. Die Lenkbuhne wird daher entsprechend tief fundiert. Durch die Verwendung von Blocksteinen sind Lenkbuhnen auch für Gebirgsbäche und -flüsse mit großer hydraulischer Belastung geeignet (Mende & Sindelar 2010).

Inzwischen wurden auch in weiteren Teilen Österreichs, in Deutschland und in der Schweiz Lenkbuhnen gebaut (Sindelar & Mende 2009, Schütz 2009, Mende & Sindelar 2010, Mende 2011, Tent 2011, Mende 2012, Werdenberg 2012a/b, Mende 2013). Die Erfahrungen hinsichtlich Uferschutz- und ökologischer Wirkung werden von allen Autoren positiv beurteilt.

### 3.4 Entstehung der induzierten Sekundärströmung

Auf die Entstehung der Sekundärströmung an Lenkbuhnen bzw. wie Lenkbuhnen wirkenden Grundswellen wurde in Kapitel 3.3 bereits tiefergehend eingegangen. Ergänzend zu den dortigen Erläuterungen soll an dieser Stelle noch kurz auf die genaue Entstehung der Grundwalze eingegangen werden. Die durch sie entstehende Querströmung leitet die Entwicklung der Sekundärströmung ein. Der Grundwalze kommt daher eine entscheidende Bedeutung zu.

Die Entstehung der Grundwalze wird für eine inklinante Schwellenanordnung am Außenufer in Gehrig (1958) genauer beschrieben (s.a. Abb. 3.7): „Die ankommende Strömung versucht, die Grundschwelle als Hindernis möglichst auf dem kürzesten Weg, also senkrecht zur Schwellenachse zu überschreiten. Die Bewegung überlagert sich mit der allgemeinen Strömung und ergibt eine Sekundärströmung, die nach der Art einer Förderschnecke von den Sandbänken des Innenufers zum Außenufer verläuft.“ Mit dem Begriff „Sekundärströmung“ ist hier wiederum eine Grundwalze gemeint.

Ähnliche Strömungs- und Geschiebetransportvorgänge wie sie in Gehrig (1958) für inklinante Grundswellen beschrieben werden, wurden auch in den Laboruntersuchungen von Tan et al. (2005) mit Leitelementen beobachtet, die mit einem relativ kleinen Seitenverhältnis  $\Lambda$  von 1/20 bis 1/60 durchgeführt wurden (Abb. 3.9). Das Seitenverhältnis ist das Verhältnis von Leitelementhöhe zu -länge (Abb. 3.4):

$$\Lambda = \frac{h_B}{l} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Bekannt ist das Prinzip der Induzierung mit lenkbuhnenähnlichen Strukturen auch aus Bootsgassen. Die V-förmigen Rippen an der Sohle der Bootsgassen können als zwei inklinante Lenkbuhnen aufgefasst werden, die an den Köpfen miteinander verbunden sind (Abb. 3.10 links). Die Rippen erzeugen zwei Sekundärströmungen, die an der Wasseroberfläche aufeinander zu laufen. Passierende Boote werden dadurch von den Wandungen weg in die

Gerinnemitte gedrückt und können die Gasse ohne Wandkontakt passieren (Abb. 3.10 rechts; Buzengeiger, undatiert).

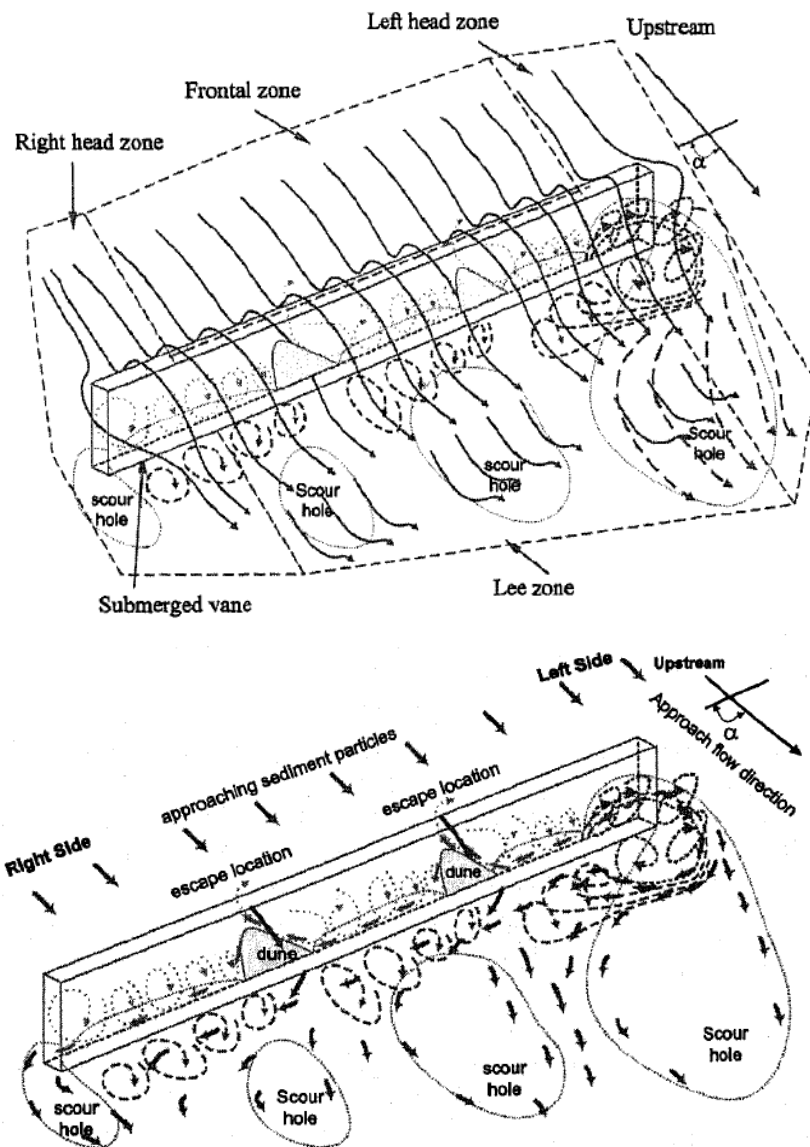


Abb. 3.9: Lokale Fließstrukturen (oben) und Geschiebepfade (unten) an einem überströmten Leitelement, Fließrichtung jeweils von oben nach unten (Tan et al. 2005)



Abb. 3.10: V-förmige Rippen in einer entleerten Bootsgasse (links); Bootsgasse in Betrieb (rechts; Fotos: Faltin)

Bei Leitelementen, für die üblicherweise ein deutlich größeres Seitenverhältnis gewählt wird als in den Versuchen von Tan et al. (2005), wird eine andere Sekundärströmungsinduzierung als bei Lenkbuhnen angenommen. Nach Odgaard & Wang (1991) und Odgaard (2009) besteht an der angeströmten Luvseite (Druckseite) eines Leitelements durch den Staudruck ein größerer Druck als an der strömungsabgewandten Leeseite (Sogseite) des Elements. Dies führt an der Leeseite zu einer nach unten gerichteten Strömungskomponente und zur Ausbildung einer Sekundärströmung, deren Zentrum nahe der Oberkante des Elements liegt (Abb. 3.1).

Das beschriebene Entstehungsprinzip der Sekundärströmung entspricht dem der „Randwirbel“ an Flugzeugtragflächen. Wird ein Tragflügel mit großem Seitenverhältnis  $\Lambda$  (hier: Verhältnis von Flügellänge zu -tiefe) wie z.B. bei einem Segelflugzeug umströmt, wird der Luftstrom am Flügel geteilt. Durch die Anstellung des Flügels muss die Luft über dem Flügel einen größeren Weg in derselben Zeit zurück legen als die unter dem Flügel. Die Geschwindigkeit über dem Flügel ist damit größer als unter ihm. Gemäß dem Gesetz von Bernoulli, wonach ein Geschwindigkeitsanstieg von einem Druckabfall begleitet wird, ist damit die Druckhöhe unter dem Flügel größer als darüber. Es entsteht der gewünschte Auftrieb. Am seitlichen Ende des Tragflügels kommt es zu einem Druckausgleich zwischen den beiden Druckzonen. Luft von der Unterseite des Flügels wird zur Oberseite gesaugt, wodurch der Randwirbel entsteht (Abb. 3.1).

In den Publikationen des IIHR wird das Leitelement als eine Tragfläche aufgefasst, dessen in y-Richtung verlaufende Längsachse um  $90^\circ$  mit dem Uhrzeigersinn gedreht und die dann in der Gewässersohle befestigte wurde. Die induzierte Sekundärströmung entspricht damit dem Randwirbel. Die Drehung um  $90^\circ$  ist der Grund, warum das Seitenverhältnis  $\Lambda$  bei Leitelementen im Gegensatz zu Tragflügeln als das Verhältnis von Elementhöhe  $h_B$  zur Länge  $l$  definiert ist.

Die Voraussetzung für die Entstehung des Auftriebs und damit auch des Randwirbels ist eine am Tragflügel bzw. Leitelement anliegende Strömung. Bei dünnen Platten, wie sie auch einfache Leitelemente darstellen, kommt es jedoch schon bei einem Anstell- bzw. Inklinationswinkel  $\alpha$  von etwa  $7^\circ$  zu Strömungsablösungen, wodurch ein Großteil des Auftriebs verloren geht. Mit Stromlinienprofilen kann ein Wert von etwa  $15^\circ$  erreicht werden (Lugt 1979). Die



von Odgaard et al. angenommene Entstehung der Sekundärströmung und die auf der Annahme aufbauende Leitelementtheorie können folglich nur für relativ kleine Inklinationswinkel gelten.



Abb. 3.11: Mit Rauch visualisierter Randwirbel an einer Tragfläche (Download am 07.12.2013 unter [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airplane\\_vortex\\_edit.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airplane_vortex_edit.jpg))

### **3.5 Konstruktive Gestaltung**

#### **3.5.1 Lenkbuhnen**

Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt werden Lenkbuhnen bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur aus unbehauenen Blocksteinen gebaut (Abb. 3.12). Unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten in der Gebirgsregion Steiermark weisen die verwendeten Steine ein Volumen von 1.5 bis 3.0 m<sup>3</sup> auf (Grober 1998), sie besitzen damit eine Masse von 4 bis 8 t. Die Steine werden zu etwa 2/3 ihrer Höhe in die anstehende Sohle eingebunden. Die tiefe Einbindung erlaubt eine gewisse, aus ökologischen Gründen gewünschte Kolkbildung an der Buhne, ohne das Bauwerk zu gefährden. Je nach hydraulischer Belastung und lokaler Fließtiefe wird der eigentliche Lenkbuhnenriegel zusätzlich durch Stützsteine gesichert (s.a. Kapitel 7.2.2). Wichtig ist eine durch zusätzliche Blocksteine erreichte gute Uferanbindung, um lokale Ufererosionen und vor allem ein Hinterspülen der Lenkbuhne zu verhindern.

Erste Erfahrungen mit Lenkbuhnen aus Holz (Fichtenspaltpfähle, Fichtenstämme) wurden im Jahr 2008 am Ellikerbach / Kanton Zürich gesammelt (Mende & Sindelar 2010, Mende 2012). Sie sind im Vergleich zu dort ebenfalls gebauten Lenkbuhnen aus Blocksteinen (Masse hier nur ca. 0.5 t) aufwändiger in der Herstellung und werden eher als Fremdkörper wahr-

genommen. Da sie jedoch ständig überströmt werden und sich schnell verfärben, sind sie für Gewässer mit eher feiner Sohle durchaus geeignet.

An der Este in der Lüneburger Heide wurden zur Strukturierung bei gleichzeitiger Verbesserung des Uferschutzes im Herbst 2010 Lenkbuhnen aus regionaltypischem Kies und Geröll gebaut (Tent 2011). Dabei wurde die eigentliche Lenkbuhne aus Geröll erstellt und oberstrom mit Kies als Laichsubstrat angeschüttet (Abb. 3.13). Bereits im April 2011 laichten hier erste Bachneunaugen (mündl. Mitteilung Ludwig Tent am 29. April 2011).

Die bisherigen Erfahrungen machen deutlich, dass auch andere Materialien als Blocksteine grundsätzlich zum Bau von Lenkbuhnen geeignet sind und somit die Materialwahl dem Gewässertyp entsprechend angepasst und naturnah gestaltet werden kann.

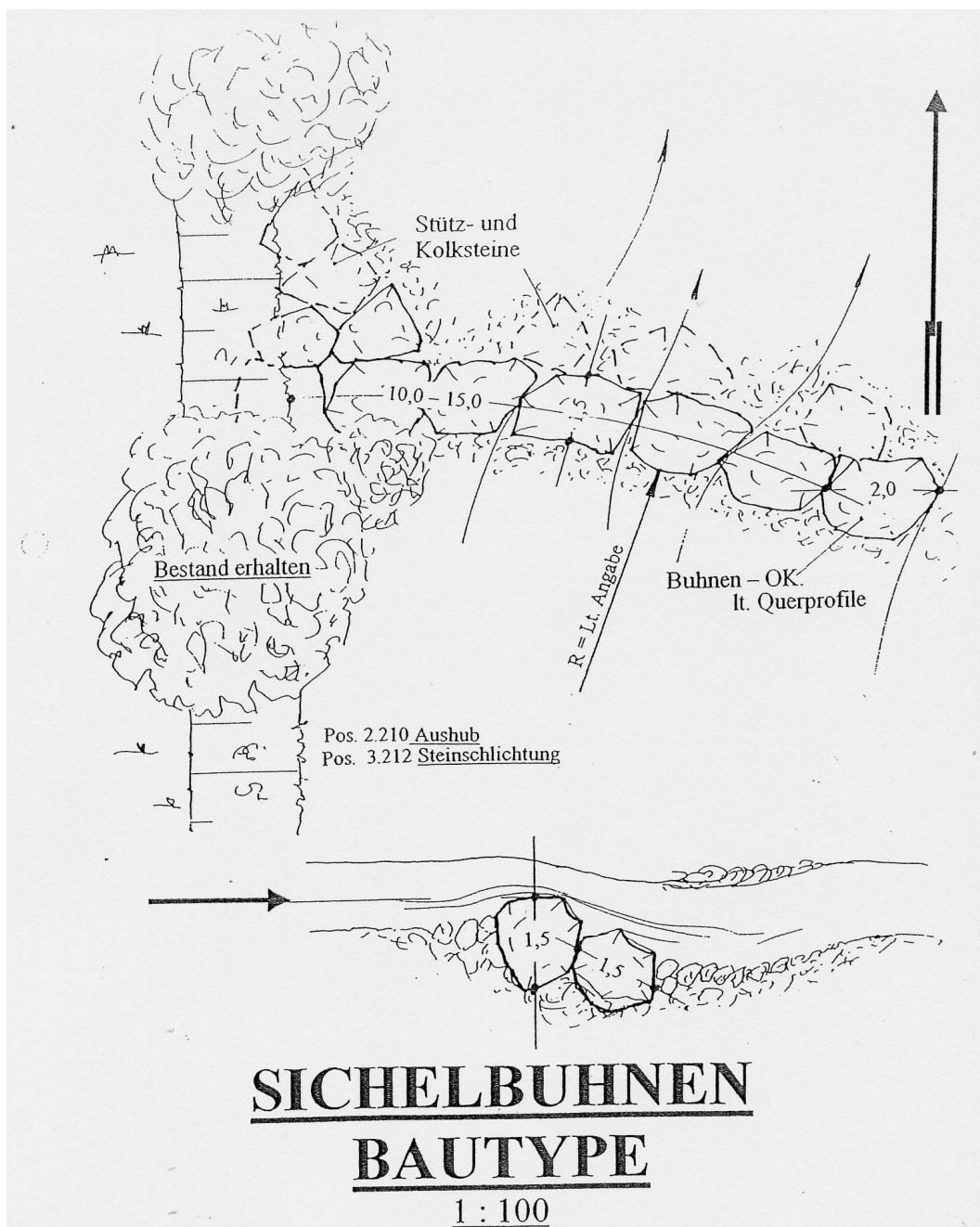


Abb. 3.12: Aufbau einer Lenkbuhne aus Blocksteinen in der Salza / Gemeinde Gußwerk (Quelle: Baubezirksleitung Bruck an der Mur, 2009)





Abb. 3.13: Lenkbuhne aus Geröll und Kies unmittelbar nach der Fertigstellung (links, Fließrichtung von links nach rechts; Foto: Tent 2010); mit Lenkbuhnen und Kiesschüttungen restaurierter Abschnitt der Este in der Lüneburger Heide bei einem mittleren Abfluss (rechts, Blick in Fließrichtung; Tent 2011)

### 3.5.2 Leitelemente

Im Gegensatz zu den Lenkbuhnen stellen Leitelemente rein technische Gewässereinbauten dar. Zur Erstellung eines schlanken, einem Tragflügel ähnlichen Bauwerks sind naturnahe Materialien ungeeignet. Ein früher Modellversuch (Odgaard & Lee 1984) wurde zwar auch mit geschütteten, dammartigen Leitelementen aus Kies und Schotter als skalierte Steinblöcke durchgeführt. Bauwerkskolke führten jedoch zu unregelmäßigen Setzungen und damit zu einer schlechten Wirkung.

In den ersten dokumentierten Naturuntersuchungen mit Leitelementen wurden Spundwände (Odgaard & Wang 1990, Guercio et al. 2004), an Doppel-T-Stahlträgern befestigte Holzbohlen (Odgaard & Mosconi 1987, Odgaard & Wang 1990, Barkdoll et al. 1999; Abb. 3.14 links) oder Betonplatten (Barkdoll et al. 1999) und gerammte Holzpfähle (Fukuoka 1989, Odgaard & Wang 1990; Abb. 3.14 rechts) verwendet.

An der Vorderkante der Leitelemente aus Stahlträgern und Holzbohlen entwickelten sich dabei starke Ablösungen und Kolke, die die induzierte Sekundärströmung abschwächten (Odgaard & Mosconi 1987, Odgaard & Wang 1991). Außerdem stellen die scharfen Kanten der Stahlträger eine Gefahr für den Bootsverkehr und für Schwimmer dar (Odgaard & Mosconi 1987). Gleiches gilt für Spundwände und Betonplatten. Bei Leitelementen aus Holzpfählen zeigten sich weniger ausgeprägte Ablösungen und Bauwerkskolke, was zu einer verbesserten Effektivität führt (Fukuoka 1989).

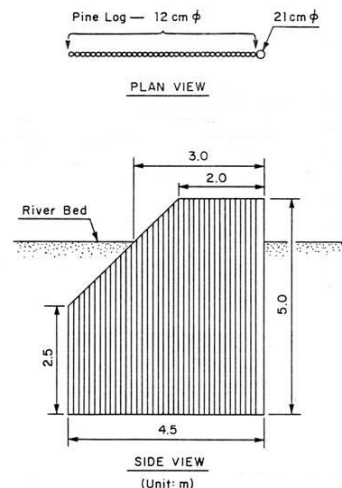
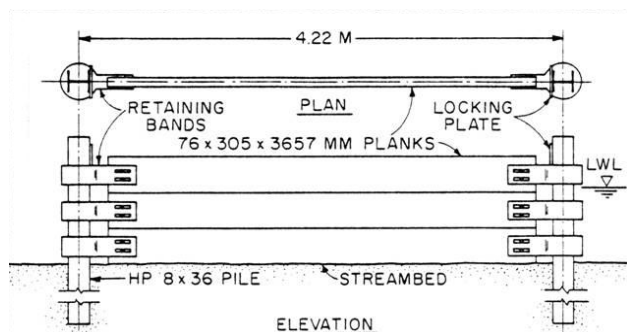


Abb. 3.14: Leitelemente aus I-Stahlträgern in Kombination mit Holzbohlen (links) und aus gerammten Holzpfählen (Odgaard & Wang 1990)

In jüngerer Zeit werden Leitelemente vor allem als doppelt gekrümmte Platten aus bewehrtem Beton hergestellt, die mit einer Pfahlgründung in der Gewässersohle verankert werden (Abb. 3.15 links). Die vertikal zur Gewässerachse ausgerichtete Vorderkante ist ausgerundet (Odgaard & Wang 1991) und bei neu entwickelten Leitelementen im oberen Bereich angeschragt (Odgaard 2009). Die Ausrundung verringert Ablösungen und Versetzungen mit Eis und Geschwemmsel (Odgaard & Wang 1991), die Abschrägung verringert die Versetzungsgefahr zusätzlich. Die Krümmung des Leitelements nimmt in Fließrichtung und zur Sohle hin zu, so dass die scharfkantige Hinterkante deutlich geneigt ist. Die verstärkte Krümmung an der Sohle soll die reibungsbedingte Verringerung der sohlennahen Fließgeschwindigkeit und die damit verbundene Abnahme der induzierten Quergeschwindigkeit kompensieren und so zu einer weitgehend linearen Verteilung der induzierten Quergeschwindigkeit führen (Odgaard & Wang 1991; s.a. Abschnitt 2.3.3).

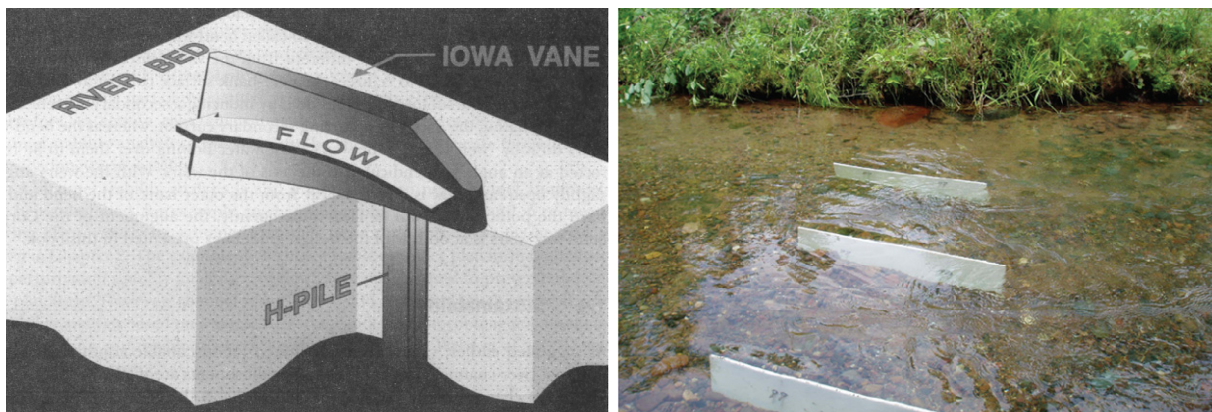


Abb. 3.15: Prinzipskizze eines doppelt gekrümmten Leitelements aus bewehrtem Beton mit Pfahlgründung (links) (Odgaard 2009); Leitelemente aus Polyethylen-Platten (Fitzpatrick et al. 2004)

Bei den jüngsten dokumentierten Feldversuchen in Wisconsin / USA (Whitman et al. 2001, Fitzpatrick et al. 2004) wurden einfache, mit Bewehrungsstangen gegründete Leitelemente aus Polyethylen-Platten (HDPE) zum Uferschutz verwendet (Abb. 3.15 rechts). Trotz der

einfachen Konstruktion waren die Ergebnisse bis auf wenige Anpassungen und Reparaturen nach extremen Hochwasserereignissen zufriedenstellend (Fitzpatrick et al. 2004).

### 3.6 Anwendungsgebiete

#### 3.6.1 Allgemeines

Lenkbuhnen und Leitelemente werden eingesetzt, wenn Querprofilbereiche hydraulisch entlastet, andere dafür stärker belastet werden sollen. Bei einer beweglichen Sohle können so weitgehend prognostizierbare Veränderungen der Querprofilgeometrie erzielt werden, wobei die Abschätzung der Veränderungen jedoch bei Lenkbuhnen viel Erfahrungswissen benötigt. Hieraus ergeben sich umfangreiche Anwendungsmöglichkeiten. Sie umfassen neben den im Folgenden ausführlicher beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten im Bereich des Uferschutzes auch

- die Geschieberegulierung bei überbreiten Abschnitten mit Auflandungstendenz (Odgaard & Wang 1990, Odgaard & Wang 1991, Friedrich 2008) sowie bei Ausleitungen und Vereinigungen (Nakato et al. 1990, Odgaard & Wang 1991, Wang et al. 1996, Nakato & Ogden 1998, Odgaard 2009; Abb. 3.16)
- Fahrrinnenvertiefungen bei Schifffahrtsstraßen (Odgaard & Wang 1991; Anm.: bisher nur bei Leitelementen bekannt)

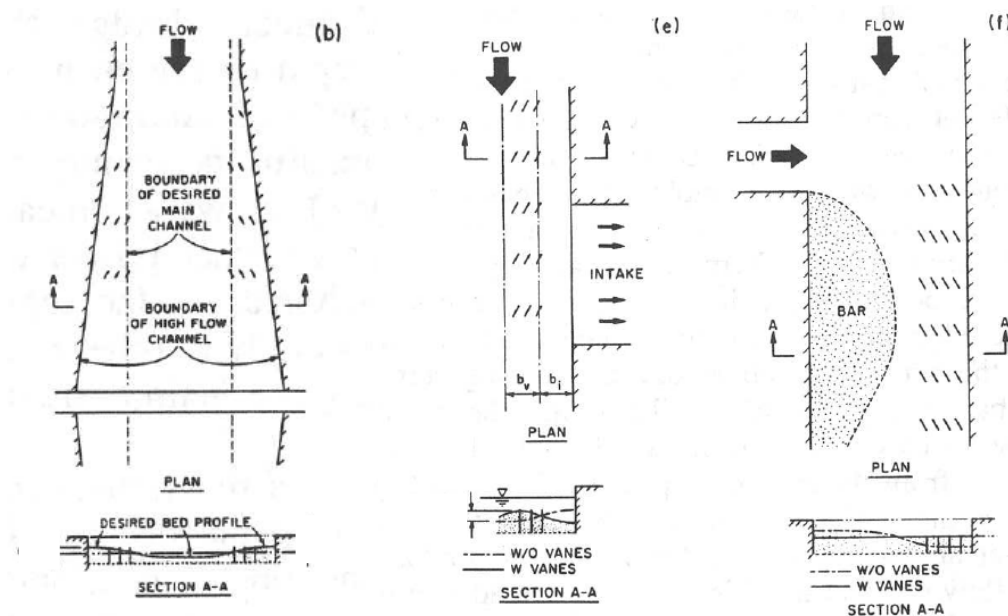


Abb. 3.16: Anwendungsmöglichkeiten von Leitelementen und Lenkbuhnen – überbreite Gewässerabschnitte (links), Ausleitungen (Mitte), Vereinigungen (rechts; Odgaard & Wang 1991, modifiziert)

Bei den Lenkbuhnen ist als weiteres Anwendungsgebiet die Gewässerstrukturierung zu nennen (Mende 2012). Dabei ermöglicht die geringe Höhe der Lenkbuhnen (Kapitel 3.2.2) in Kombination mit Eintiefungen außerhalb des Lenkbuhnenbereichs, Lenkbuhnen auch unter

stark beengten Platzverhältnissen wie in städtischen Gebieten einzusetzen (Mende & Koll 2008, Mende 2012). Primär zur Strukturierung werden z.B. deklinante Strömungstrichter aus zwei gegenüberliegend angeordneten Lenkbuhnen verwendet (Abb. 3.5a).

### 3.6.2 Uferschutz an Prallufern

#### 3.6.2.1 Lenkbuhnen

Ein wesentliches Einsatzgebiet von Lenkbuhnen bildet die Sicherung von Prallufern, wo sie üblicherweise in Gruppen angeordnet werden (Abb. 3.17 und Abb. 3.18). Die am Prallufer inklinant angeordneten Lenkbuhnen induzieren eine Sekundärströmung, die die entgegengesetzte Drehrichtung der krümmungsinduzierten Sekundärströmung aufweist. Weisen beide Sekundärströmungen die gleiche Stärke auf, heben sie sich gegenseitig auf. Der Stromstrich und der Talweg werden dadurch in Richtung Innenufer verlagert. Die Strömungsverhältnisse ähneln einer geraden Gewässerstrecke, was sich auch in der Querprofilgeometrie widerspiegelt (Abb. 3.17 unten). Die Ausbildung eines ufergefährdenden Kurvenkolks wird verhindert, Auflandungen am Innenufer werden abgetragen (Mende 2012). Eine zusätzliche Sicherheit gegen die Ausbildung eines Kurvenkolks ergibt sich darüber hinaus aus der Wirkung der Lenkbuhnen als lokale Sohlenfixpunkte innerhalb des Querprofils.

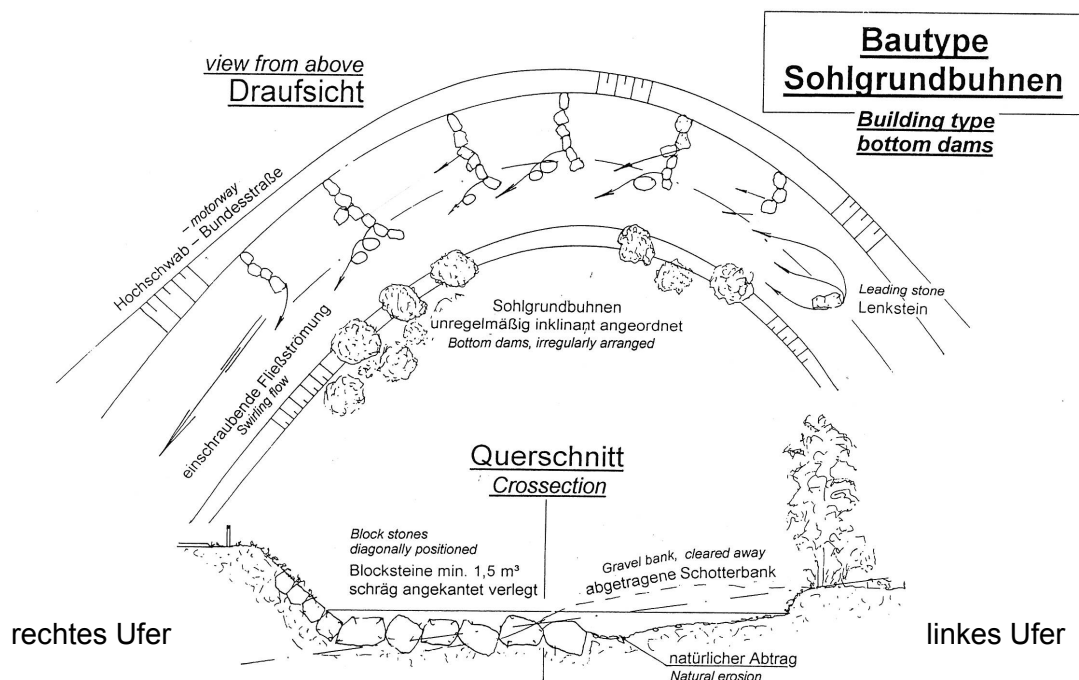


Abb. 3.17: Ausführungsbeispiel einer Lenkbuhnengruppe zum Schutz eines Prallufers mit uferparallel verlaufender Bundesstraße an der Salza / Steiermark (Grober 1998, modifiziert)

Trotz der Verhinderung der Kurvenkolkausbildung ist der Gewässerbereich sehr strukturreich, da sich im Umfeld der Lenkbuhnen eine hohe Strömungsdiversität mit großer Tiefenvarianz und Substratsortierungen ausbildet (Glüh 2005, Werdenberg et al. 2012b). Darüber hinaus können durch die Lenkbuhnen auch entlang des Außenufers verstärkt ingenieurbio-logische Bauweisen verwendet und so ein ökologisch wertvoller Gehölzsaum entwickelt wer-



den. Ohne Lenkbuhnen sind die hydraulische Belastung und die Mittelwasserfließtiefe für die Verwendung ingenieurbilogischer Bauweisen, deren Durchwurzelungstiefe unter der Mittelwasserlinie sehr limitiert ist (Oplatka 1998), häufig zu groß.

Das Einsatzgebiet von einseitig in Gruppen angeordneten Lenkbuhnen erstreckt sich bisher von kleinen Gewässern mit Sohlenbreiten von wenigen Metern bis hin zu großen Flüssen wie der Mur mit einer Sohlenbreite von ca. 50 m (Mende & Sindelar 2010, Mende 2012).



Abb. 3.18: Lenkbuhnen zum Schutz eines Prallufers der Mürz / Steiermark. Die Lenkbuhnen schließen untermittelbar an den bestehenden Blocksatz am linken Ufer an, der vollständig erhalten werden konnte und seit dem Einbau stabil ist (Blick in Fließrichtung; Mende 2012).

### 3.6.2.2 Leitelemente

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Anwendung liegt auch bei Leitelementen im Uferschutz in Krümmungen (Abb. 3.19 und Abb. 3.20), wo sie ebenso wie Lenkbuhnen durch die induzierte Sekundärströmung den Stromstrich und Talweg in Richtung Innenufer verlagern.

Modellversuche in Krümmungen zeigten sowohl bei breiten (Odgaard & Wang 1990, Odgaard & Wang 1991) als auch kompakten Gerinnen (Voisin & Townsend 2002), dass Leitelemente die Ausbildung eines ufergefährdenden Kurvenkolks vollständig verhindern können und sich stattdessen eine nahezu horizontale Sohle einstellt. Zusätzlich zu den Modellversuchen konnte die uferschützende Wirkung auch in Naturversuchen nachgewiesen werden (z.B. Odgaard & Mosconi 1987, Fukuoka 1989, Odgaard & Wang 1990, Odgaard & Wang 1991, Whitman et al. 2001, Fitzpatrick et al. 2004). Das Sohlenmaterial bestand bei fast allen Naturversuchen primär aus Sand, bei Odgaard & Mosconi 1987 mehrheitlich aus Schluff. Lediglich ein Naturversuch wurde an einem kleinen kiesführenden Fluss, dem Feng-Shan-Creek in Taiwan (Einzugsgebietsfläche 250 km<sup>2</sup>,  $I_0 = 1.5 \text{ ‰}$ , Medianwert des Korndurchmessers  $d_{50} = 21 \text{ mm}$ ) durchgeführt. Zum Einsatz kamen hier Spundwandelemente (Odgaard 2009).

Aus den Angaben kann geschlossen werden, dass die hydraulische Belastung in den Naturversuchen mit Leitelementen als gering bis höchstens mittel (vgl. Tab. 2.1) einzustufen war. Lenkbuhnen werden dagegen auch bei hohen hydraulischen Belastungen bis zu Schubspannungen von  $200 \text{ N/m}^2$  im Bemessungsfall  $HQ_{100}$  eingesetzt (Werdenberg et al. 2012b).

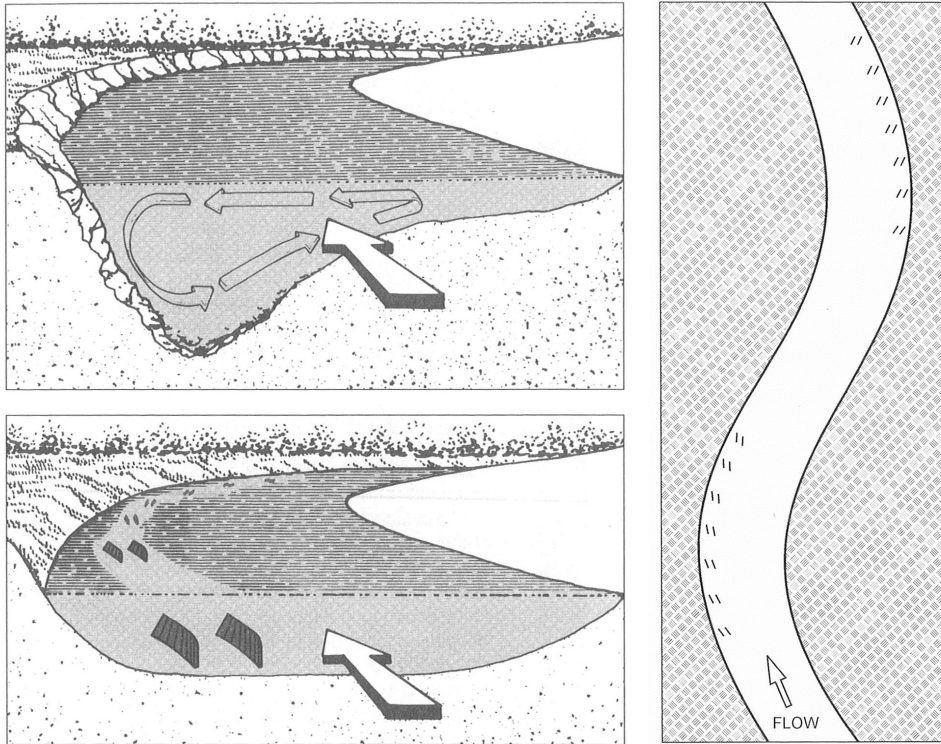


Abb. 3.19: Leitelemente zur Verhinderung von Krümmungserosion: Krümmungsinduzierte Sekundärströmung (links oben); die vane-induzierte Sekundärströmung hebt die krümmungsinduzierte auf, wodurch das Prallufer stabilisiert wird (links unten); typische Anordnung von Leitelementen in Flusskrümmungen (rechts; Odgaard 2009)



Abb. 3.20: Einbau von Iowa Vanes an einem erodierenden Prallufer des Wapsipinicon River bei Niedrigwasserabfluss im Jahr 1988 (links). Der gleiche Flussabschnitt ist zwei Jahre später durch deutliche Verlandung im Bereich des Prallufers gekennzeichnet (rechts; Download am 12.06.2005 unter <http://www.iihr.uiowa.edu/projects/iowaVanes>)



### 3.6.3 Uferschutz und Strukturaufwertung in geraden Gewässerstrecken

#### 3.6.3.1 Lenkbuhnen

In geraden Gewässerabschnitten kommen vor allem „Strömungstrichter“, also beidseitig angeordnete Lenkbuhnenpaare (Kapitel 3.2.2) zum Einsatz. Je nach Anordnung zur Strömung (deklinant oder inklinant) werden unterschiedliche Strömungs- und Kolkbilder hervorgerufen (Sindelar et al. 2007, Sindelar & Mende 2009; Abb. 3.5). Wie bereits in Kapitel 3.6.1 erläutert, werden deklinante Trichter vor allem zur Strukturierung verwendet. Zum Uferschutz kommen inklinante Trichter zum Einsatz. Durch die induzierten Sekundärströmungen und Eintiefungen zwischen den Buhnenköpfen werden der Stromstrich und der Talweg in die Gewässermitte verlagert und die Ufer entlastet.

Abb. 3.21 zeigt beispielhaft einen inklinanten Strömungstrichter in der Liesing bei Kalwang / Steiermark, der zum Schutz der Widerlager einer wenig oberhalb liegenden Brücke eingebaut wurde. Da Lenkbuhnen als lokale Sohlenfixpunkte wirken (Kapitel 3.6.2) wird ein Unterkolken der Widerlager verhindert. Neben dem Schutz der Brücke werden unterstrom beide Ufer entlastet, so dass auf weitere Sicherungsmaßnahmen verzichtet werden konnte (Mende 2012).



Abb. 3.21: Inklinanter Strömungstrichter zum Schutz der Widerlager einer oberhalb liegenden Brücke und zur Entlastung der Ufer unterhalb wenige Wochen nach Einbau (Mende 2012)

### 3.6.3.2 Leitelemente

Ebenso wie Lenkbuhnen werden auch Leitelemente zum Uferschutz in geraden Gewässerabschnitten verwendet, wo sie ebenfalls beidseitig angeordnet werden (Abb. 3.22 links). In Abb. 3.22 (rechts) sind gut die gewünschten Auflandungen in Ufernähe zu erkennen. Die Auflandungen werden durch den infolge der Sekundärströmung zum Ufer gerichteten Geschiebetransport und einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit und der Sohlenschubspannung im Vanebereich hervorgerufen. Die Fließgeschwindigkeit nimmt in den Bereichen mit Leitelementen um etwa 20% gegenüber der Situation ohne Elemente ab (Wang & Odgaard 1993).

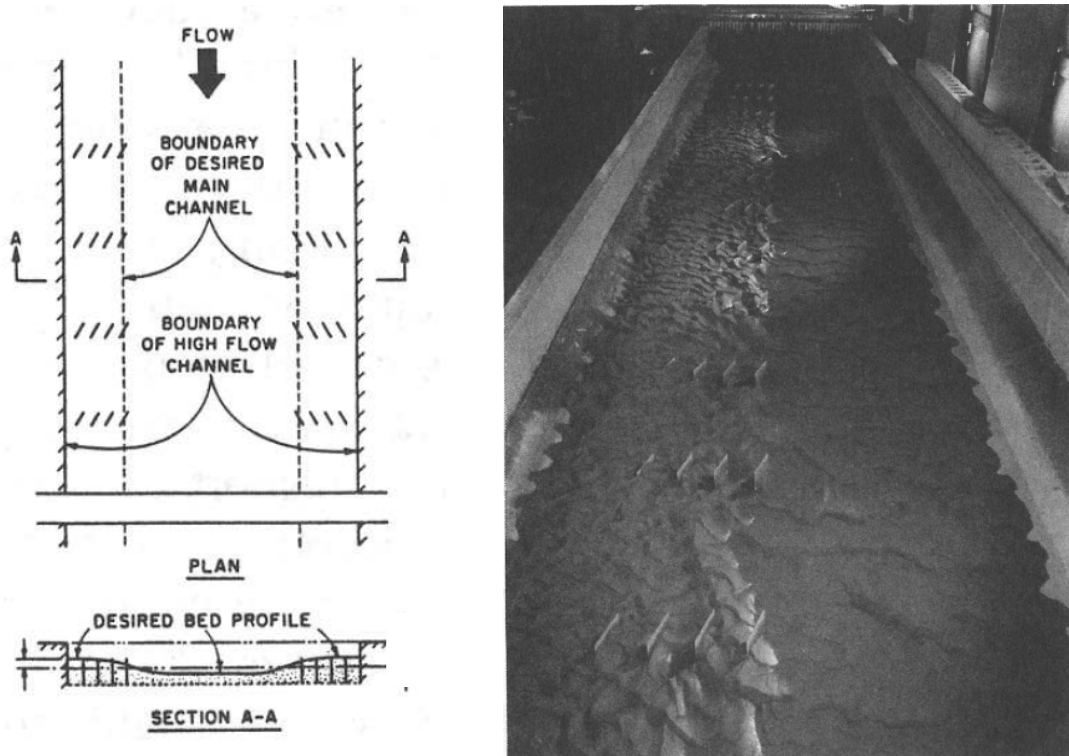


Abb. 3.22: Schematisch dargestellte Leitelementanordnung zum Uferschutz in einer geraden Strecke (links); Blick gegen die Fließrichtung in eine trockengelegte, als Halbmodell dienende Versuchsrinne mit beweglicher Sohle und einseitig angeordneten Leitelementen (rechts; Odgaard & Wang 1991, modifiziert)

### 3.7 Unterschiede zwischen Lenkbuhnen und Regelungs- bzw. Uferschutzbuhnen

Der Begriff „Regelungsbuhne“ wird im Folgenden für Buhnen verwendet, die primär der Flussregelung nach DIN 4054 dienen, also dem „Wasserstraßenausbau zur Verbesserung der Wasserstands- und Strömungsverhältnisse durch flussbauliche Maßnahmen mit Ausnahme von Stauanlagen“. Als „Uferschutzbuhnen“ werden Buhnen bezeichnet, die primär zum Schutz vor Seitenerosion gebaut werden.



### 3.7.1 Bauwerkshöhe

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen Lenk-, Regelungs- und Uferschutzbuhnen ist die Bauwerkshöhe. Aus der Höhe resultiert, ob und wie stark die Buhne im Bemessungsfall überströmt wird, was für die hydraulische Wirkung von grundlegender Bedeutung ist.

Der Buhnenrücken von Regelungsbuhnen liegt üblicherweise auf Höhe des Ausbauwasserstands, der an den meisten europäischen Schifffahrtsstraßen etwa dem bei Mittelwasserabfluss entspricht (Schröder & Römisch 2001).

Uferschutzbuhnen werden in der Regel höher gebaut als Regelungsbuhnen. Bei Buhnen mit geneigtem Rücken (engl. *Rock Vanes* oder *Stream Barbs*; Abb. 3.23) liegt der höchste Punkt auf dem Niveau des bordvollen Wasserstands (Alvarez 1989, Lagasse et al. 2001, Rosgen 2001, Matsuura & Townsend 2004, NRCS 2005, Yossef 2005), der häufig etwa bei einem  $HQ_{1.5}$  erreicht wird (NRCS 2000, Matsuura & Townsend 2004, NRCS 2005). Bei Uferschutzbuhnen mit horizontalem Rücken (engl. *Bendway Weirs*; Abb. 3.24) liegt der Rücken wie bei Regelungsbuhnen im Bereich des Mittelwasserstands (Lagasse et al. 2001).

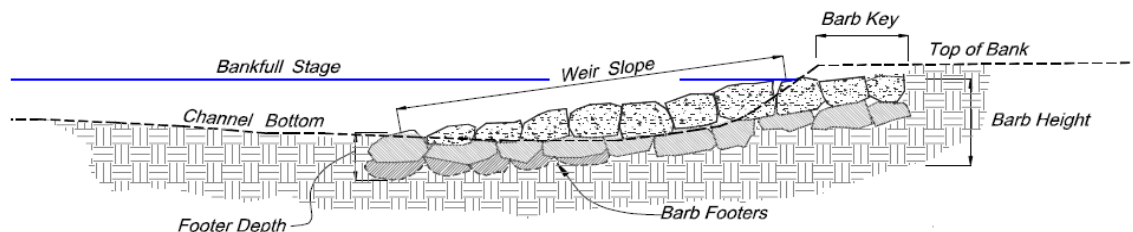


Abb. 3.23: Buhne („Stream Barb“) mit einheitlicher Rückenneigung - Schnitt entlang der Buhnenachse (NRCS 2005)



Abb. 3.24: Buhne („Bendway Weir“) mit horizontalem Rücken (Thornton et al. 2005)

Uferschutz- und Regelungsbuhnen werden damit nur bei Abflüssen, die größer als der Mittelwasserabfluss sind, überströmt. Wie groß die relative Höhe bei großen Hochwasserereignissen (z.B.  $HQ_{100}$ ) ist, lässt sich anhand der Angaben in der Literatur nicht genau abschätzen.

zen, da diese sich ausschließlich auf den bordvollen Abfluss beziehen. Es ist aber davon auszugehen, dass der Wasserstand aufgrund des Ausufers nach Erreichen des bordvollen Abflusses nicht mehr stark ansteigt. Mit dem bordvollen Abfluss als Bemessungsabfluss  $Q_b$  ergeben sich folgende relative Buhnenhöhen  $H_b$ :

- Hochwasserfreie Buhnen:  $H_b \geq 1$
- Buhnen mit Rückenneigung = Kopfneigung (Abb. 3.23):  $H_b = 1/2$
- Buhnen mit Rückenneigung < Kopfneigung:  $H_b > 1/2$

Für die durch den horizontalen Rücken gekennzeichneten Bendway Weirs, wird für den bordvollen Abfluss eine relative Höhe  $H_b$  von  $1/3$  bis  $1/2$  angegeben (Lagasse et al. 2001).

Die relative Höhe von Regelungs- und Uferschutzbuhnen ist damit wesentlich höher als die von Lenkbuhnen, für die Angaben von  $H_b = 1/10$  bis  $1/9$  gemacht werden (Kapitel 3.2.2).

### 3.7.2 Hydraulik

Abgesehen von hochwasserfreien Buhnen werden alle Buhnen zumindest bei großen, für den Uferschutz relevanten Abflüssen temporär überströmt. Aus diesem Grund wird auf den umströmten Zustand, bei dem die bekannten „Buhnenfeldwalzen“ auftreten (z.B. Winkel 1947, Krouzecky 2004, Abad et al. 2008), nicht weiter eingegangen.

Überströmte Buhnen können hydraulisch als Wehr aufgefasst werden (Weber et al. 2000, Krouzecky 2004, Yossef 2004). Sie führen zu einem Aufstau, das Wasserspiegelliniengefälle in den Buhnenfeldern ist folglich geringer als im Hauptgerinne (Aya et al. 1997, NRCS 2005). Die daraus resultierende Wasserspiegeldifferenz zwischen benachbarten Buhnenfeldern wird über dem Rücken abgebaut. Dadurch kommt es bei Buhnen mit geneigtem Rücken bei allen Abflüssen bis mindestens zum Bemessungsabfluss zur Ausbildung eines Wechselsprungs, der mit steigendem Wasserstand in Richtung Buhnenwurzel wandert (Abb. 3.25).



Abb. 3.25: Wechselsprung im Umfeld einer Stream Barb bei 75% des bordvollen Abflusses (NRCS 2005)

Im Unterschied zu anderen Buhnen werden Lenkbuhnen bereits bei Niedrigwasser überströmt (Kapitel 3.1.2). Sie ähneln daher in ihrer hydraulischen Wirkung eher Grundschwellen



nach DIN 19661-2 als Buhnen. Grundswellen wie auch Lenkbuhnen ragen nur wenig über die Sohle hinaus. Ein Fließwechsel mit Wechselsprung, wie er für überströmte Buhnen typisch ist, kann daher nur bei kleinen Abflüssen auftreten. Aus diesem Grund haben Lenkbuhnen bei großen Abflüssen keine gefällevermindernde Wirkung und gleichen hydraulisch unwirksamen Abstürzen. Als wesentlicher Unterschied zu „reinen“ Grundswellen, die meist rechtwinklig zur Strömung über die gesamte Sohlenbreite angeordnet werden, werden Lenkbuhnen entweder inklinant oder deklinant angeordnet (Kapitel 3.2.2). Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Induzierung der Sekundärströmung.

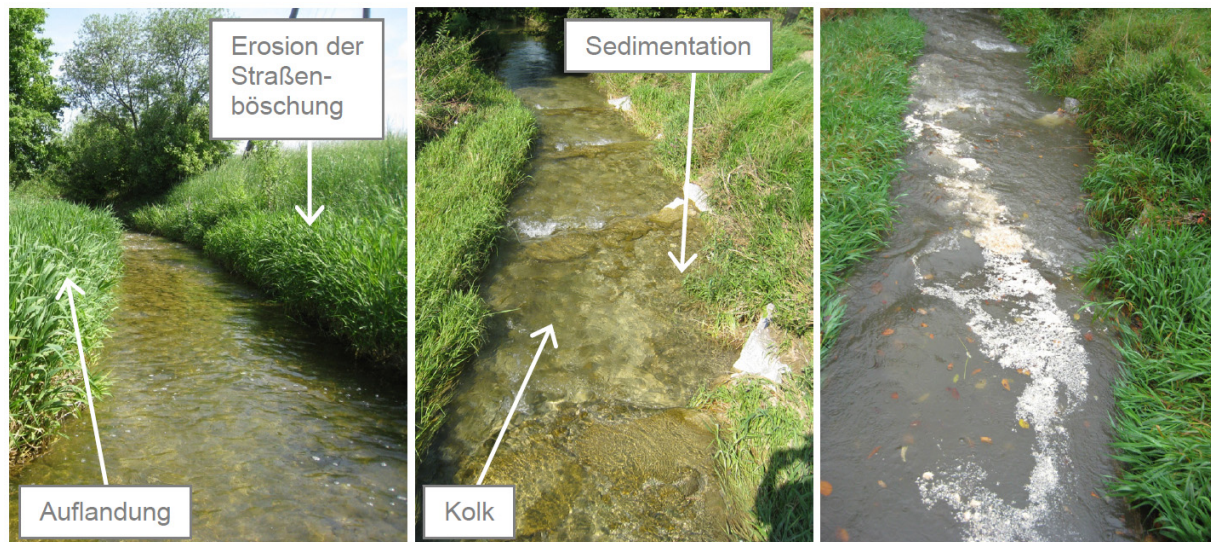


Abb. 3.26: Situation vor (links) und zwei Monate nach dem Einbau von Lenkbuhnen (Mitte); mit Holzeinstreu visualisierte Oberflächenströmung bei erhöhtem Abfluss (rechts); Blick in Fließrichtung (Mende & Sindelar 2010)

Die Hydraulik von Ufer- bzw. Regelungsbuhnen und Lenkbuhnen unterscheidet sich damit grundlegend. Dies lässt den Schluss zu, dass die Erkenntnisse zu Buhnen und die daraus abgeleiteten Bemessungsansätze (z.B. Rosgen 2001, NRCS 2005) nicht auf Lenkbuhnen übertragbar sind.

### 3.8 Beurteilung der Bauweisen

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, weisen Leitelemente und Lenkbuhnen große Ähnlichkeiten hinsichtlich der Wirkungsweise auf. Sie unterscheiden sich jedoch grundlegend hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung (Kapitel 3.5). Hieraus ergeben sich nicht nur bei der ökologischen Beurteilung der Bauweisen wesentliche Unterschiede.

#### 3.8.1 Ästhetik / Landschaftsbild

Da Lenkbuhnen aus unbehauenen Blocksteinen gebaut und ständig überströmt werden (Kapitel 3.1.2 und 3.5), fügen sie sich gut in das Landschaftsbild ein (z.B. Abb. 3.18, Abb. 3.26). Im Gegensatz dazu wirken Leitelemente sehr technisch und werden eher als Fremdkörper wahrgenommen. Dies wird noch verstärkt, da Leitelemente aufgrund ihrer größeren Höhe relativ häufig aus dem Wasser hinausragen.

### 3.8.2 Ökologie

Das Umfeld von Lenkbuhnen ist durch eine große Strömungsvielfalt und damit einhergehende Sedimentfraktionierungen und Tiefenvarianz gekennzeichnet (z.B. Glüh 2005, Hagemann 2006, Mende & Koll 2008, Mende 2012). Den damit verbundenen positiven Einfluss auf die Fischfauna konnten Pinter et al. (2009) in einem umfassenden fischökologischen Monitoring an der Mur belegen. Sie beurteilen die Lenkbuhnen wie folgt: „Hinsichtlich der Fragestellung, ob die neu errichteten Strukturen (Trichterbuhnen) eine fischökologische Verbesserung für den Gesamtabschnitt bewirken, ist besonders hervorzuheben, dass vier Fischarten, nämlich die drei typischen Begleitarten Neunauge und Schmerle sowie Flussbarsch und Rotaugen ausschließlich im Bereich der Buhnenfelder nachgewiesen werden konnten. Dies ist als klarer Beleg dafür zu werten, dass die Buhnenstrukturen die Lebensraumqualität erhöhen.“ Ähnlich positiv wurden auch Lenkbuhnen beurteilt, die im Sommer 2008 im Ellikerbach / Kanton Zürich gebaut wurden. Im Bereich der Lenkbuhnen kam es zu einer annähernden Verdopplung der Fischindividuenzahl. Die Zahl der großen Fische (Länge > 30 cm) vervielfachte sich sogar, was auf die neu entstandenen Kolke, die gute Fischeinstände darstellen, zurückgeführt wurde (Mende & Sindelar 2010).

Neben der Wirkung auf die Fischfauna sind auch die unverbauten bzw. naturnah mit ingenieurb biologischen Bauweisen geschützten Ufer positiv zu beurteilen. Sie ermöglichen eine enge Wasser-Land-Vernetzung, einen standorttypischen Bewuchs und gewährleisten die Zugänglichkeit für Mensch und Tier (Abb. 3.27).



Abb. 3.27: Voralpenfluss Taverna / Kanton Freiburg wenige Monate nach der Umgestaltung – die unverbauten und ausschließlich mit Lenkbuhnen gesicherten Ufer bieten eine gute Quervernetzung (Foto: Mende 2012)

Ebenso wie bei Lenkbuhnen wird auch bei Leitelementen nicht bzw. nur punktuell in die Ufer eingegriffen. Im Vergleich zu den Lenkbuhnen ist jedoch die Strömungsvielfalt im Umfeld der rein technischen Leitelemente, die alle die gleiche Geometrie besitzen, wesentlich kleiner. Gleiches gilt für die Tiefenvarianz und Substratfraktionierungen. Hinzu kommt, dass die ökologisch wichtige Kolkbildung an den Elementen durch die Wahl kleiner Inklinationswinkel möglichst vermieden wird.

### **3.8.3 Einbau**

Der Einbau von Lenkbuhnen erfordert insbesondere bei großen Fließtiefen einen guten Baggerfahrer, der die tonnenschweren Blocksteine auch unter Wasser exakt setzt. Es bedarf in der Regel einer gewissen Einarbeitungsphase, nach der der Einbau jedoch meist reibungslos funktioniert. Hinsichtlich des Einbaus bestehen ggf. gewisse Vorteile bei den Leitelementen, da die vorgefertigten Betonelemente oder Spundwände relativ einfach auf die erforderliche Einbaukote gerammt werden können.

### **3.8.4 Hydraulische Belastbarkeit**

Wie bereits erwähnt werden Lenkbuhnen in der Regel aus Blocksteinen gebaut und überstehen daher auch große hydraulische Belastungen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den Leitelementen, die aufgrund ihrer schlanken Form und relativ großen Höhe nur bei geringer bis mittlerer Belastung verwendet werden können.

### **3.8.5 Baukosten**

Sowohl die Baukosten für Lenkbuhnen als auch Leitelemente werden auf etwa die Hälfte von dem beziffert, was eine vergleichbare „traditionelle“ Ufersicherung wie Blocksatz oder Steinerschüttungen kostet (Odgaard 2009, Werdenberg et al. 2012b).

### **3.8.6 Verletzungsgefahr**

Dank verbesserter Wasserqualität unterliegen unsere Flüsse heute wieder einer verstärkten Freizeitnutzung. Insbesondere für Schwimmer und Schlauchbootfahrer besteht an den scharfkantigen Leitelementen eine nennenswerte Verletzungsgefahr. Sie ist an den Lenkbuhnen deutlich geringer. Bei Bedarf können gezielt leicht abgerundete Steine eingebaut werden, wodurch die Verletzungsgefahr weiter gesenkt wird.

### **3.8.7 Fazit**

Lenkbuhnen stellen eine besonders naturnahe und kostengünstige Form der Ufersicherung dar, die sich gut ins Landschaftsbild einfügt und auch großen hydraulischen Belastungen standhält. Eine vermehrte Verwendung dieser Bauweisen wäre daher sehr wünschenswert. Aufgrund des stark begrenzten Wissensstands und fehlender Bemessungsansätze werden Lenkbuhnen jedoch eher zurückhaltend eingesetzt (Kapitel 1.1).



Wie in Kapitel 3.7 erläutert wurde, können die Erkenntnisse und Bemessungsansätze zu Regelungs- und Uferschutzbuhnen aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Wirkung nicht auf Lenkbuhnen übertragen werden. Leitelemente weisen dagegen eine ähnliche Wirkung wie Lenkbuhnen auf. In dem nächsten Kapitel soll daher überprüft werden, ob der Wissensstand zu Lenkbuhnen durch die Erkenntnisse zu Leitelementen verbessert und darauf aufbauend Bemessungsansätze abgeleitet werden können.

## 4 Überprüfung der Übertragbarkeit der Leitelementtheorie auf Lenkbuhnen

### 4.1 Lineare Tragflächentheorie als Grundlage für die Leitelementtheorie

Wie bereits in Kapitel 3.4 erläutert, wird in den Publikationen des IIHR davon ausgegangen, dass die durch Leitelemente hervorgerufene Sekundärströmung nach dem gleichen Prinzip wie der Randwirbel an einem Tragflügel mit großem Seitenverhältnis entsteht. Die Leitelemente werden daher als einseitig in der Gewässersohle befestigte Tragflügel mit großem Seitenverhältnis beschrieben, dessen in y-Richtung verlaufende Längsachse um 90° mit dem Uhrzeigersinn gedreht wurde. Aus diesem Grund ist die Richtung der Auftriebskraft  $F_L$  (Synonym: Liftkraft) bei Leitelementen horizontal definiert und nicht vertikal wie bei Tragflügeln üblich (Abb. 4.1; Odgaard 2009).

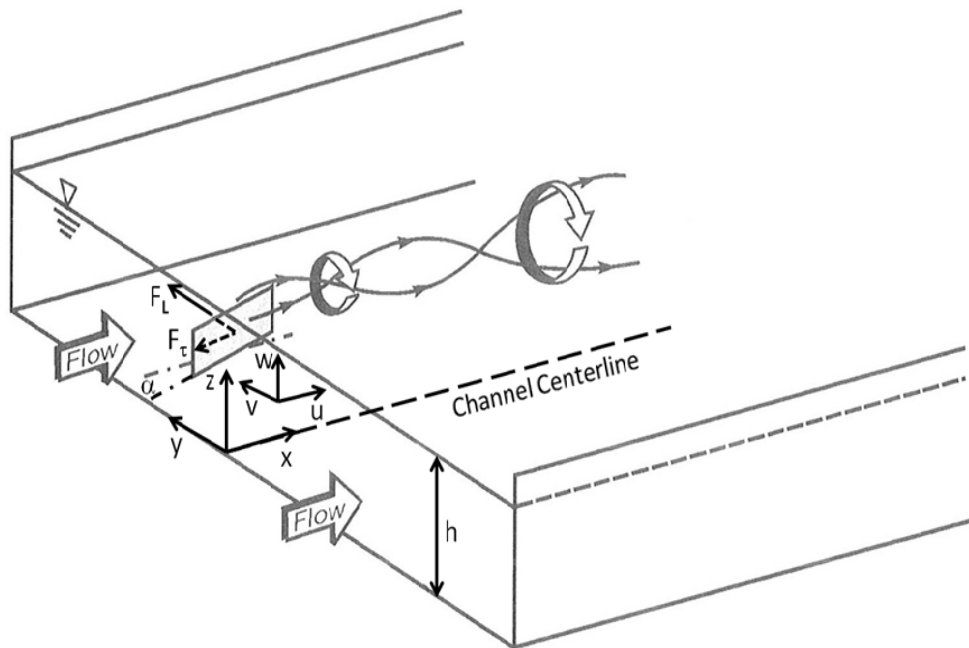


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des durch ein einzelnes Leitelement hervorgerufenen Strömungsbildes mit Definition der Koordinaten, der Geschwindigkeitskomponenten, des Inklinationwinkels, der Fließtiefe und der Kräfte am Element (Odgaard 2009, modifiziert)

Für Tragflügel mit großem Seitenverhältnis gilt die „Lineare Tragflächentheorie“. Sie besagt, dass der Auftriebsbeiwert  $c_L$  linear mit dem Anstell- bzw. Inklinationwinkel  $\alpha$  ansteigt (Abb. 4.2 und Gl. 4.1; Sabersky & Acosta 1964, Prandtl et al. 1993).

$$c_L = 2 \cdot \pi \cdot \alpha$$

Gl. 4.1

Diese lineare Beziehung gilt jedoch nur so lange, wie die Strömung an dem Tragflügel bzw. Leitelement anliegt. Eine anliegende Strömung kann jedoch, je nach Geometrie des Flügels, nur bei Winkeln bis 7° bzw. maximal 15° gewährleistet werden (Kapitel 3.4). Hieraus kann

bereits geschlossen werden, dass die lineare Tragflächentheorie als Grundlage für die analytische Beschreibung und darauf aufbauender Bemessungsansätze für Lenkbuhnen bestenfalls bedingt geeignet ist.

## 4.2 Leitelementtheorie des IIHR

Im Folgenden wird die Herleitung der Leitelementtheorie und der auf ihr basierenden Bemessungsansätze des IIHR in gekürzter Form dargestellt. Aufgrund der Komplexität der Herleitung und bestenfalls bedingten Übertragbarkeit der Theorie auf Lenkbuhnen wird bewusst auf Erläuterungen zu Zwischenschritten verzichtet. Nur die wichtigsten Formeln und Grundsätze werden kurz beschrieben.

Odgaard & Spoljaric (1986a) leiteten aus der Messung der Widerstandskraft  $F_r$  und der Auftriebskraft  $F_L$  an Leitelementen verschiedener Geometrien (Variierte Parameter: Seitenverhältnis, Dicke, Platte / Tragflügelprofil) die Auftriebs- und Formwiderstandsbeiwerte  $c_L$  und  $c_W$  ab (Abb. 4.2).

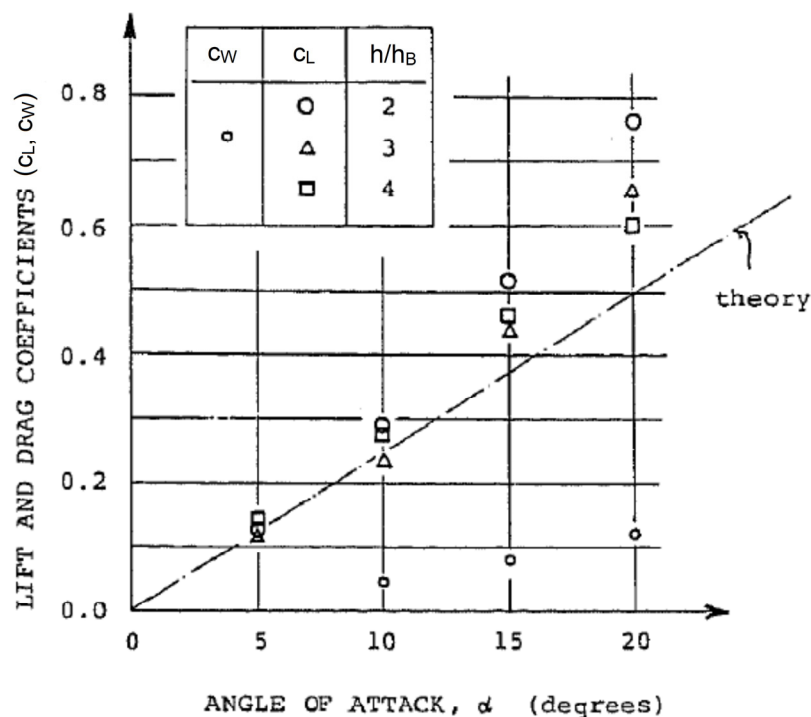


Abb. 4.2: Aus Messungen abgeleitete mittlere Auftriebsbeiwerte  $c_L$  und Formwiderstandsbeiwerte  $c_W$  eines ebenen dünnwandigen Leitelements mit  $\Lambda = h_B/l = 0.3$  (Odgaard & Spoljaric 1986a, modifiziert)

Um die ermittelten Auftriebsbeiwerte analytisch zu beschreiben, wurde Gl. 4.1 angepasst, da sie theoretisch ist und nur für Flügel mit unendlichem Seitenverhältnis (Spannweiten-Tiefen-Verhältnis) gilt.

Bei einem Tragflügel mit endlicher Spannweite führen die Randwirbel jedoch zu einer nach unten gerichteten Strömungskomponente, die die gleichförmige Anströmung stört und den effektiven Anströmungswinkel  $\alpha'$  verringert.



$$\alpha' = \alpha - \eta \quad \text{Gl. 4.2}$$

Für eine endliche Platte in ungestörter Luftströmung und einer elliptischen Verteilung der Zirkulation am Flügel kann  $\eta$  nach Bertin & Smith (1979) berechnet werden:

$$\eta = \frac{c_L}{\pi \cdot \left( \frac{h_B}{l} \right)} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Aufgrund der einseitigen Einbindung und dem damit verbundenen Auftreten von nur einem Randwirbel nahmen Odgaard & Mosconi (1987) an, dass der effektive Anströmungswinkel nur um die Hälfte von  $\eta$  verringert werden muss. Folglich ist

$$c_L = 2 \cdot \pi \cdot \left( \alpha - \frac{1}{2} \eta \right) = 2 \cdot \pi \cdot \left( \alpha - \frac{1}{2} \cdot \frac{c_L}{\pi} \cdot \frac{l}{h_B} \right) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha}{1 + \frac{l}{h_B}} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Unter Verwendung von Gl. 4.4 kann dann die in Bezug zum Staudruck gesetzte Liftkraft berechnet werden:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot \rho \cdot l \cdot h_B \cdot u^2 \quad \text{Gl. 4.5}$$

Auch die Scherkraft  $F_\tau$  (s. Abb. 4.1) auf das Leitelement kann über den Staudruck berechnet werden:

$$F_\tau = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot l \cdot h_B \cdot u^2 \quad \text{Gl. 4.6}$$

Hieraus folgt

$$F_\tau = \frac{c_w}{c_L} \cdot F_L \quad \text{Gl. 4.7}$$

und

$$c_w = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{l}{h_B} \cdot c_L^2 \quad \text{Gl. 4.8}$$

Als Bemessungsziel für Krümmungen nennen Odgaard & Kennedy (1983) und Odgaard & Mosconi (1987) die vollständige Aufhebung der krümmungsinduzierten Sekundärströmung (Kapitel 2.2). Dadurch kommt es zur Ausbildung einer annähernd horizontalen Sohle, der Kurvenkolk wird verfüllt und die Geschwindigkeit am Prallufer reduziert. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das durch die Leitelemente hervorgerufene Drehmoment  $M_B$  genauso groß wie das krümmungsinduzierte Drehmoment  $M_K$  sein und die umgekehrte Drehrichtung besitzen. Aufbauend auf Gl. 2.19 berechnet sich das kurveninduzierte Drehmoment im Schwer-

punkt eines Volumenelements mit dem Krümmungswinkel  $\theta$  (Abb. 4.3) wie folgt (Odgaard & Mosconi 1987):

$$M_K = \int_{r_i}^{r_a} \int_0^h \frac{u^2}{r} \cdot \left(z - \frac{h}{2}\right) \cdot r \cdot \theta \cdot dz \cdot dr = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \tilde{u}^2 \cdot \frac{m+1}{m^2+2 \cdot m} \cdot b_{So} \cdot \theta \cdot h^2 \quad \text{Gl. 4.9}$$

Das durch eine Anzahl von Leitelementen  $n_B$  hervorgerufene Drehmoment  $M_B$  ist (Odgaard & Mosconi 1987):

$$M_B = n_B \cdot \int_0^{h_B} \left(\frac{h}{2} - z\right) \cdot dF_L = \frac{1}{4} \cdot c_L \cdot \rho \cdot l \cdot h_B \cdot \tilde{u}^2 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{h_B}{h}\right)^{\frac{2+m}{m}} \cdot \left[ \frac{(m+1)^2}{m \cdot (m+2)} - \frac{m+1}{m} \cdot \frac{h_B}{h} \right] \cdot n_B \quad \text{Gl. 4.10}$$

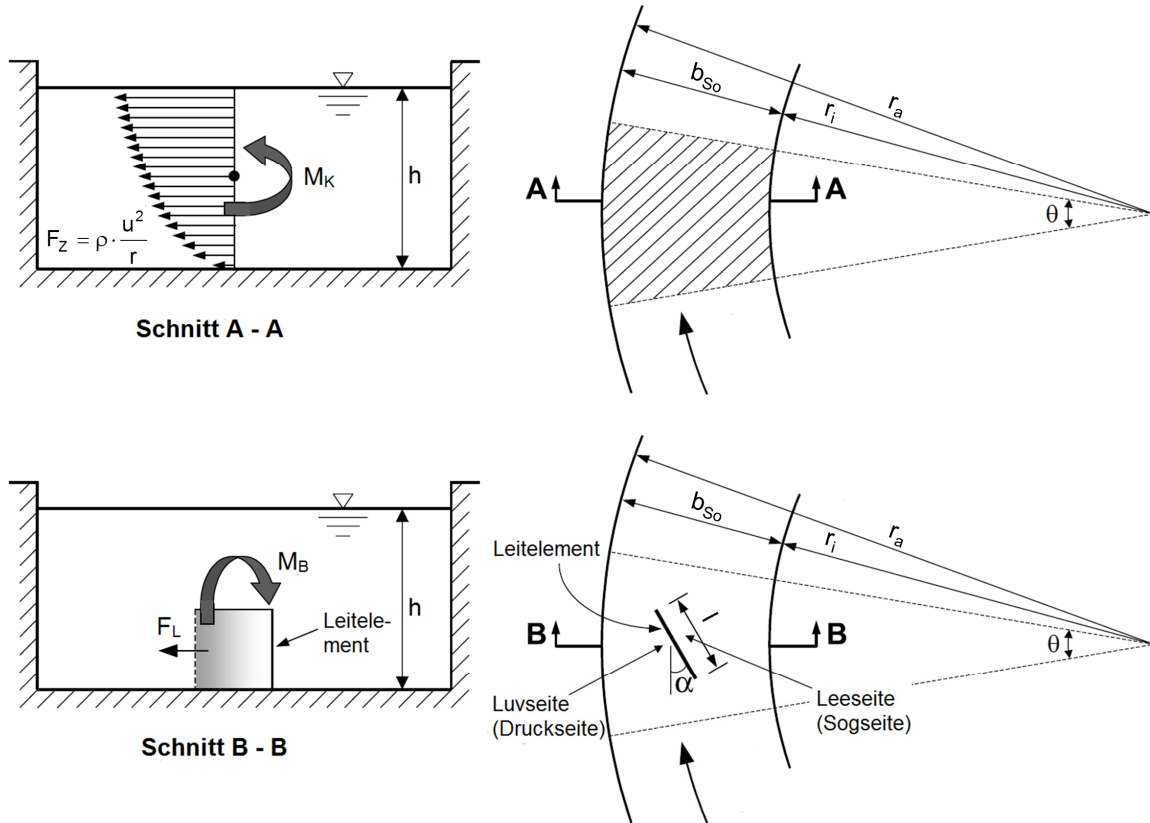


Abb. 4.3: Definitionsskizze einer krümmungsinduzierten Sekundärströmung (oben) und einer vaneinduzierten Sekundärströmung (unten; Odgaard & Mosconi 1987, modifiziert)

Der Bemessungsansatz für Leitelemente zum Uferschutz in Krümmungen wurde durch Gleichsetzen des krümmungsinduzierten Drehmoments  $M_K$  (Gl. 4.11) und des leitelementinduzierten Drehmoments  $M_B$  (Gl. 4.12) hergeleitet:

$$\frac{n_B \cdot h_B \cdot l}{A} = \frac{n_B \cdot h_B \cdot l}{r \cdot \theta \cdot b_{So}} = \frac{2}{c_L} \cdot \frac{h}{r} \cdot f_B \quad \text{Gl. 4.11}$$

mit der Leitelementfunktion

$$f_B = \left( \frac{h}{h_B} \right)^{2/m} \cdot \left[ (m+1) - (m+2) \cdot \frac{h_B}{h} \right]^{-1} \quad \text{Gl. 4.12}$$

$n_B$  Anzahl der notwendigen Leitelemente [ - ]

$A$  Sohlenfläche des betrachteten Flussabschnitts [ $\text{m}^2$ ]

$\theta$  Krümmungswinkel des betrachteten Flussabschnitts [ - ]

Mit Gl. 4.11 lässt sich die für eine bestimmte Sohlenfläche  $A$  benötigte angeströmte Leitelementfläche berechnen, um die krümmungsinduzierte Sekundärströmung vollständig aufzuheben.

In späteren Publikationen (Odgaard & Wang 1991, Odgaard 2009) wird auch ein Bemessungsverfahren vorgestellt, bei dem als Bemessungsziel die gewünschte Veränderung der lokalen Sohlenlage festgelegt wird. Das Verfahren ist bei geraden Gewässerstrecken und Krümmungen anwendbar. In dem Verfahren wird die Änderung der Sohlenlage über die durch die Leitelemente hervorgerufene flächengemittelte Sohlenschubspannung berechnet, wobei die Lift- und Scherkraft als Eingangsdaten für ihre Berechnung dienen. Da das Verfahren für die weiteren Betrachtungen zu Lenkbuhnen nicht von Belang ist, soll an dieser Stelle nur kurz darauf hingewiesen und nicht weiter eingegangen werden.

#### 4.3 Kritik an der Leitelementtheorie

Bei den Laboruntersuchungen am IIHR wurden die Leitelementparameter (Inklinationswinkel  $\alpha$ , relative Bauwerkshöhe  $H$  (Gl. 3.2) und Seitenverhältnis  $\Lambda$  (Gl. 3.4)) in einem nur relativ kleinen Bereich variiert:

$$\alpha = 5 \div 25^\circ$$

$$H = 0.3 \div 0.5$$

$$\Lambda = 0.3 \div 0.5$$

Dieses Vorgehen ist nachvollziehbar, wenn davon ausgegangen wird, dass die Sekundärströmungsinduzierung durch Leitelemente durch dieselben Prozesse wie die Randwirbelbildung an Tragflächen mit großem Seitenverhältnis hervorgerufen wird (Kapitel 3.4). Demnach wäre zu erwarten, dass bei über den Anwendungsbereich der linearen Tragflächentheorie hinausgehenden Parameterkonstellationen (z.B. Inklinationswinkel  $\alpha \gg 15^\circ$ ) höchstens schwache Sekundärströmungen induziert werden.

Wie jedoch Untersuchungen an anderen Instituten (z.B. Marelius & Sinha 1998, Tan et al. 2005, Gupta et al. 2006) zeigten, wirken Leitelemente auch dann noch, wenn ihre Parameter stark von den vom IIHR empfohlenen abweichen.

Besonders deutlich wurde dies bei Laboruntersuchungen von Marelius & Sinha (1998), die erstmals Untersuchungen mit Inklinationswinkeln von  $25^\circ$  und mehr durchführten, die am

IIHR aufgrund erwarteter Strömungsablösungen und großer Bauwerkskolke unberücksichtigt blieben.

Die in zwei Querprofilen bei  $x = 15$  bzw.  $48$  cm (Elementmitte:  $x = 0$ ) durchgeführten 3D-Geschwindigkeitsmessungen an einem Einzelement mit Inklinationswinkeln  $\alpha$  von  $25^\circ$  bis  $57^\circ$  und  $H = 0.3$  zeigten, dass größere Winkel bei gleicher Elementlänge  $l$  zwar zu tieferen Bauwerkskolken (Abb. 4.4) führen, dafür aber die induzierte Sekundärströmung stärker ist. Zur Beschreibung der Sekundärströmung berechneten die Autoren den Drehimpuls  $L$  (Abb. 2.2) im Querprofil bei  $x = 48$  cm als Maß für die Wirbelstärke. Der größte Drehimpuls wurde bei einem Inklinationswinkel von  $40^\circ$  bestimmt (Abb. 4.5).

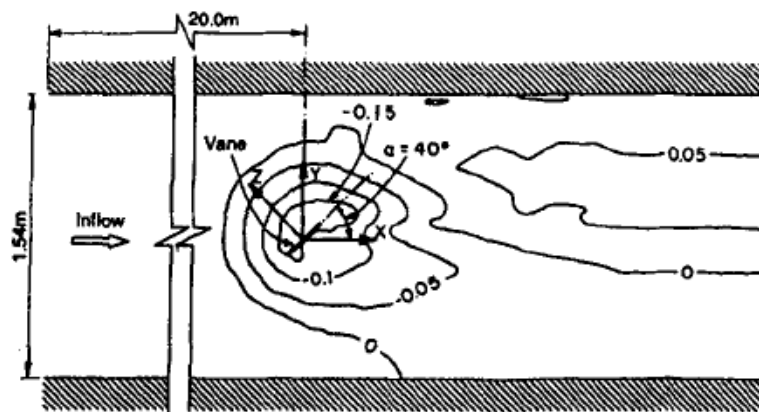


Abb. 4.4: Draufsicht auf den Bauwerkskolk an einem Leitelement bei  $\alpha = 40^\circ$  (Marelius & Sinha 1998)

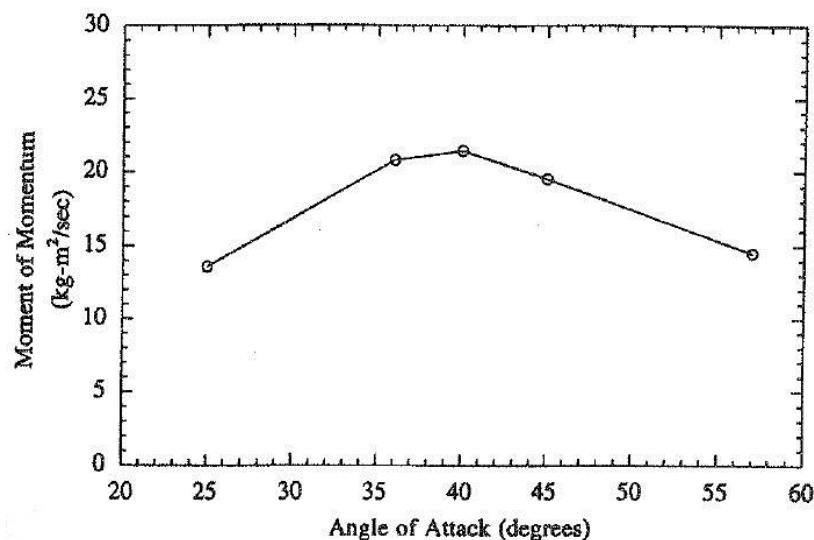


Abb. 4.5: Induzierter Drehimpuls  $L$  bei  $x = 48$  cm in Abhängigkeit vom Inklinationswinkel  $\alpha$  (Marelius & Sinha 1998)

Trotz eines leicht veränderten Versuchsaufbaus ermittelten auch Gupta et al. (2006) bei  $40^\circ$  den größten Drehimpuls. Im Unterschied zu Marelius & Sinha (1998) befestigten sie die Sohle an der Vorderkante der Elemente zur Verhinderung von Bauwerkskolken. Außerdem wurde die relative Höhe  $H$  von  $0.25$  bis  $0.4$  variiert. Es konnte jedoch kein nennenswerter Ein-

fluss der Höhe auf den induzierten Drehimpuls nachgewiesen werden, was ebenfalls im Widerspruch zur Leitelementtheorie steht.

Flokstra et al. (1998, unveröffentlicht, zitiert in van Zwol 2004) führten an einem einzelnen Leitelement Messungen zum Einfluss der Länge und dem mit ihr verknüpften Seitenverhältnis auf die Lift- und Widerstandskräfte in einem Bereich von  $\Lambda = 0.125$  bis  $0.25$  durch. Der Vergleich der gemessenen mit den auf der theoretischen Basis des IIHR berechneten Lift- bzw. Widerstandskräften zeigte, dass die gemessenen Kräfte um einen Faktor 2 bis 4 größer als die berechneten waren. Außerdem zeigte sich, dass die Kräfte weit stärker von der Länge und damit dem Seitenverhältnis abhängen, als es der Theorie nach zu erwarten gewesen wäre. Tendenziell wird also die Wirkung von Elementen mit kleinem Seitenverhältnis in der Theorie stark unterschätzt.

Ergänzend zu den oben genannten Untersuchungen zum Einfluss der Länge führten Jongeling & Flokstra (2001, unveröffentlicht, zitiert in van Zwol 2004) Messungen zum Einfluss der Vanehöhe auf die Lift- und Scherkräfte an Spundwandelementen und dünnwandigen ebenen Vanes durch. Zusätzlich zu den Kraftmessungen wurden auch Messungen der Quergeschwindigkeit in der Nähe und unterstrom der Elemente durchgeführt. Das Seitenverhältnis  $\Lambda$  wurde von  $0.075$  bis  $0.30$  und die relative Höhe  $H$  von  $0.1$  bis  $0.4$  variiert. Beide Parameter weichen damit teilweise stark von den Empfehlungen des IIHR ab. Auch bei den Untersuchungen von Jongeling & Flokstra (2001) zeigten sich bei den gemessenen Lift- und Widerstandskräften große Abweichungen von  $70$  bis  $150\%$  bzw.  $130$  bis  $280\%$  gegenüber den nach IIHR berechneten. Die Untersuchungen ergaben außerdem, dass die Theorie den Einfluss kleiner Elemente auf die sohlennahe Quergeschwindigkeit unterschätzt, wohingegen der Einfluss großer Elemente überschätzt wird. Jongeling & Flokstra (2001) ziehen die Schlussfolgerung, dass eine ausreichend genaue Berechnung der am Element wirkenden Kräfte für die gewählten Parameterbereiche mit dem Verfahren des IIHR nicht möglich ist. Gleiches gilt für die sohlennahe Quergeschwindigkeit.

Van Zwol (2004) untersuchte den Einfluss der relativen Elementhöhe ( $H = 0.2$  bis  $0.5$ ) und des Inklinationswinkels ( $\alpha = 10^\circ$  bis  $40^\circ$ ) auf das Strömungsbild und die Kolkbildung. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Stärke des Primärwirbels (entspricht der induzierten Sekundärströmung), der gemäß Theorie des IIHR der einzige entstehende Wirbel ist, mit dem Winkel zunimmt. Ab  $30^\circ$  bilden sich zusätzlich Hufeisenwirbel. Ähnliche Wirbelbilder beschreiben auch Marelius & Sinha (1998). Van Zwol (2004) stellte bei den Untersuchungen außerdem fest, dass Strömungsablösungen am Leitelement bereits bei  $10^\circ$  auftreten, womit eigentlich bereits der größte Teil des Auftriebs und damit des Primärwirbels verloren gehen müsste.

Van Zwol (2004) schloss daraus, dass die lineare Tragflächentheorie als Grundlage für die Theorie des IIHR ungeeignet ist. Sie gilt nur für Flügel mit großem Seitenverhältnis und ist daher für Leitelemente nicht geeignet. Folglich werden auch die Strömungsvorgänge an einem Leitelement nicht befriedigend berücksichtigt. Fehlerhaft sind daher nach von Zwol (2004) auch die auf Grundlage der Theorie berechneten Auftriebs- und Formwiderstandsbeiwerte und damit die Auftriebs- und Scherkräfte am Element. Van Zwol (2004) überprüfte daher anhand gemessener Auftriebs- und Scherkräfte bei Inklinationswinkeln bis  $20^\circ$ , inwieweit die für Flügel mit kleinem Seitenverhältnis gültige „nichtlineare Tragflächentheorie“ (s.a.

Kapitel 4.5) auf Leitelemente übertragbar ist. Es zeigte sich, dass die Berechnung der Auftriebs- und Scherkräfte nach Anpassung der Theorie von Odgaard et al. unter Verwendung der nichtlinearen Modelle nach Bollay (1939) und Gersten (1957) verbessert werden konnte. Die Verwendung eines auf der Theorie von Bollay (1939) basierenden Modells wird für Seitenverhältnisse  $\Lambda < 0.1$  empfohlen. Bei größeren Verhältnissen liefert das Modell von Gersten (1957) bessere Ergebnisse. Aufgrund fehlender Untersuchungen ist diese Aussage bisher auf Winkel bis  $20^\circ$  beschränkt. Eine abschließende Theorie wurde von van Zwol (2004) nicht erarbeitet.

Wie Marelus & Sinha (1998) und van Zwol (2004) untersuchten auch Tan et al. (2005) detailliert die Strömungsbilder im Nahbereich eines Leitelements, zusätzlich ermittelten sie die mit ihnen verbundenen Geschiebepfade (Abb. 3.9, Kapitel 3.4). Der Schwerpunkt ihrer Untersuchungen lag im Einfluss der Parameter relative Höhe ( $H = 1/8$  bis  $1/3$ ) und Inklinationswinkel ( $\alpha = 15$  bis  $90^\circ$ ) auf die Geschiebelenkung an einem einzelnen Element in einer geraden Laborrinne. Das Seitenverhältnis lag im Bereich von  $\Lambda = 0.0125$  bis  $0.15$ , was also ebenso wie die relative Höhe stark von den Empfehlungen des IIHR ab. Ihre Messungen zeigen, dass unmittelbar ober- und unterstrom des Leitelements parallel zur Bauwerksachse verlaufende Grundwalzen entstehen, die an der Sohle gegen die Fließrichtung drehen. Die Walze unterstrom des Elements, also an der Leeseite, ist dabei die größere und zeigt auch eine größere Drehgeschwindigkeit. Die Leewalze ist jedoch nicht stabil, sondern löst sich lokal von der Sohle und interagiert dann mit der Hauptströmung. Innerhalb beider Walzen wird Geschiebe zum Ende des Elements transportiert. Die Autoren konnten darüber hinaus feststellen, dass Geschiebe nach Bildung eines Gleichgewichtskolks unterstrom des Elements an den Kolkrändern entlang transportiert wird und nicht in die Kolke fällt (Abb. 3.9 rechts). Das Strömungsbild und der beschriebene Geschiebetransportmechanismus gleichen damit dem Grundsatz nach stark dem von Gehrig (1958) für inklinante Grundswellen beschriebenen (Kapitel 3.3 und 3.4), wo allerdings aufgrund der relativ flachen Neigung der Luvseite keine Walzenbildung vor der Schwelle auftrat. Die an dem Leitelement beobachteten Strömungsbilder widersprechen damit fundamental denen, die der Theorie des IIHR zugrunde liegen.

Auch Odgaard & Wang (1991) war bewusst, dass die durch ihre Theorie beschriebenen Strömungsvorgänge am Leitelement vereinfachend sind und insbesondere bei größeren Inklinationswinkeln nur annähernd mit den wirklichen Vorgängen übereinstimmen. Sie weisen darauf hin, dass die gute Übereinstimmung zwischen theoretischer und experimentell ermittelter Tiefenverteilung trügerisch ist, da Strömungsablösungen bereits bei den von ihnen verwendeten Inklinationswinkeln auftreten und die induzierte Sekundärströmung wie auch die Sohlenschubspannung folglich von den berechneten Werten abweichen müssten. Eine Erklärung für die beobachtete Übereinstimmung wird in der durch die induzierte Sekundärströmung gegenüber einer ungestörten Strömung veränderten Geschwindigkeitsverteilung gesehen (Wang & Odgaard 1993). Die stark vereinfachende Annahme einer Geschwindigkeitsverteilung gemäß dem Potenzgesetz (Gl. 2.19, Kapitel 2.3.3) scheint folglich die Abweichungen, die aus den Strömungsablösungen an den Elementen resultieren müssten, zu kompensieren.

Die Ergebnisse der genannten Autoren verdeutlichen, dass die Theorie und die darauf aufbauenden Bemessungsansätze des IIHR nur gelten, wenn die Parameter Inklinationswinkel  $\alpha$ , Seitenverhältnis  $\Lambda$  und relative Höhe  $H$  in einem eng definierten Bereich variiert werden. Weichen sie davon ab, nimmt die Wirkung der Leitelemente jedoch nicht wie von Odgaard und Coautoren angenommen zwangsläufig ab. Die genannten Untersuchungen zeigen, dass die stärkste Wirkung sogar häufig erst außerhalb des definierten Bereichs auftritt. So zeigten z.B. die Untersuchungen von Marelius & Sinha (1998) den größten induzierten Drehimpuls bei  $40^\circ$ , also weit außerhalb des am IIHR untersuchten Bereichs von  $5 - 25^\circ$ .

Typische Lenkbuhnenanordnungen und -geometrien (vgl. Kapitel 3.2) weichen ebenfalls stark von dem definierten Bereich ab. Es kann daher mit Sicherheit gesagt werden, dass die, auf der linearen Tragflächentheorie basierende Leitelementtheorie zur analytischen Beschreibung der Strömungsvorgänge an Lenkbuhnen und zur Entwicklung darauf aufbauender Bemessungsansätze ungeeignet ist.

Dies soll im Folgenden anhand einiger Berechnungsbeispiele, bei denen Formeln für Leitelemente bei Lenkbuhnenanordnungen und -geometrien angewandt werden, verdeutlicht werden.

#### **4.4 Berechnungsbeispiele: Anwendung von Formeln des IIHR bei Lenkbuhnen**

Die Verifizierung der theoretischen Grundlagen und Bemessungsansätze erfolgte am IIHR im Rahmen von Modell- und Naturversuchen vor allem über den Vergleich von prognostizierter und gemessener Änderung der Querprofilgeometrie, außerdem über lokale Messungen der Längs- und Quergeschwindigkeit (z.B. Odgaard & Kennedy 1983, Odgaard & Spoljaric 1986b, Odgaard & Wang 1991). Der Untersuchungsschwerpunkt lag folglich auf der Erfassung der Auswirkungen der Strömung.

Erst Wang & Odgaard (1993) legten den Schwerpunkt auf die Strömung selbst und führten umfangreiche 2D-Geschwindigkeitsmessungen in einer geraden Rinne mit einseitiger Vaneanordnung durch (Abb. 4.6). Mit Hilfe der Messungen konnten sie zeigen, dass die Ausdehnung der induzierten Sekundärströmung, die sie über die dimensionslose Quergeschwindigkeit  $v/u_m$  beschrieben, auf den „Vanebereich“ begrenzt ist. Als Vanebereich wird die Aufstandsfläche der Vanes inklusive der Fläche zwischen den Vanegruppen bezeichnet, in diesem Fall also die rechte Gerinnehälfte (Abb. 4.7a). Im unteren Einbaubereich (Querprofile 10 und 12) war die Sekundärströmung annähernd voll entwickelt.

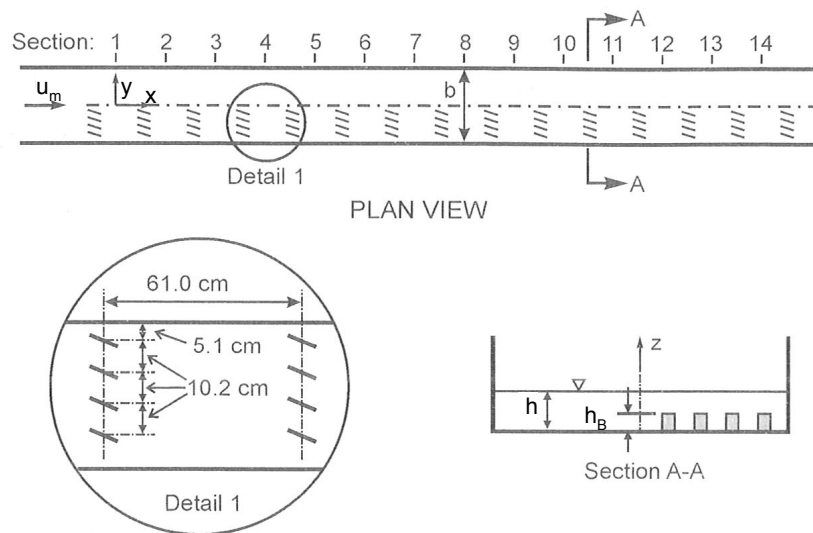


Abb. 4.6: Einseitige Leitelementanordnung in einer geraden Versuchsrinne (Wang & Odgaard 1993, modifiziert)

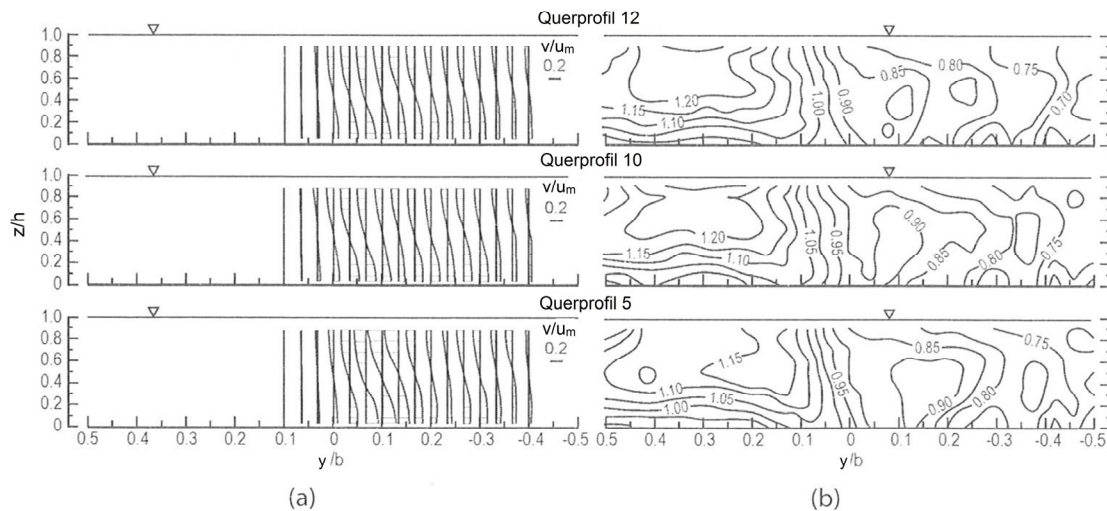


Abb. 4.7: Geschwindigkeitsverteilung innerhalb und außerhalb des Leitelementbereichs; a) dimensionslose Quergeschwindigkeit  $v/u_m$  [-] und b) dimensionslose Fließgeschwindigkeit  $u/u_m$  [m/s] (Wang & Odgaard 1993, modifiziert)

Die relative Fließgeschwindigkeit  $u/u_m$  nahm innerhalb des Einbaubereichs der Vanes ab und außerhalb davon in gleichem Maße zu (Abb. 4.7b). Im unteren Einbaubereich der Vanes, der durch eine annähernd voll entwickelte Sekundärströmung gekennzeichnet ist (s.o.), verändert sich auch die Geschwindigkeitsverteilung kaum mehr. Die Verringerung der relativen Fließgeschwindigkeit betrug hier im Mittel ca. 18%, d.h.  $u/u_m \approx 0.82$  (Abb. 4.7b). Außerhalb des Einbaubereichs nahm die Geschwindigkeit im gleichen Maße zu ( $u/u_m \approx 1.18$ ).

Mit ihrer Veröffentlichung lieferten Wang & Odgaard (1993) erst zu einem späten Zeitpunkt der Vaneforschung ein detailliertes Bild des Elementeinflusses auf die Verteilung der Längs- und Quergeschwindigkeit über den Querschnitt und in Fließrichtung und ermöglichten damit detaillierte Aussagen zur Interaktion von Haupt- und Sekundärströmung. Wichtige und für das Verständnis wesentliche Grundlagenversuche wurden folglich „nachgeholt“. Der späte



Zeitpunkt ist vermutlich darauf zurück zu führen, dass die notwendige Messtechnik (z.B. 2D-ADV-Sonden) vorher noch nicht ausreichend weit entwickelt war.

Aufgrund der großen Bedeutung der Versuche von Wang & Odgaard (1993) und der aus ihnen abgeleiteten Beziehungen wird der Schwerpunkt in den folgenden Kapiteln 4.4.1 und 4.4.2 auf sie gelegt.

#### 4.4.1 Berechnung der Quergeschwindigkeitsverteilung über die Tiefe

Wie die Laboruntersuchungen von Wang & Odgaard (1993) zeigten, kann die Verteilung der vaneinduzierten Quergeschwindigkeit  $v$  über die Tiefe in guter Näherung über eine lineare Verteilung beschrieben werden, wie sie auch Rozovskii (1957) in ähnlicher Form für die krümmungsinduzierte Quergeschwindigkeit verwendete (Kapitel 2.3.3, Gl. 2.15):

$$\frac{v}{\tilde{u}} = -2 \cdot c \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{z}{h} \right) = c \cdot \left( \frac{2 \cdot z}{h} - 1 \right) \quad \text{Gl. 4.13}$$

mit:

$$c = \exp \left( -0.02 \cdot \frac{a_x}{h_B} \right) \cdot \tan \alpha \quad \text{Gl. 4.14}$$

$\tilde{u}$  = über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit ohne Leitelemente [m/s]

Berechnet man mit Gl. 4.13 die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche  $v_s$  wird  $z/h = 1$ . Somit gilt:

$$c = \frac{v_s}{\tilde{u}} \quad \text{Gl. 4.15}$$

Die dimensionslose Größe  $c$  wird im Folgenden als „relative Quergeschwindigkeit“ bezeichnet. Berechnet man  $c$  mit Gl. 4.14 für große, bei Lenkbuhnen üblichen Inklinationswinkeln von  $60^\circ$  und mehr (Kapitel 3.2), wird deutlich, dass die Formel ungeeignet ist (Bsp. Abb. 4.8).

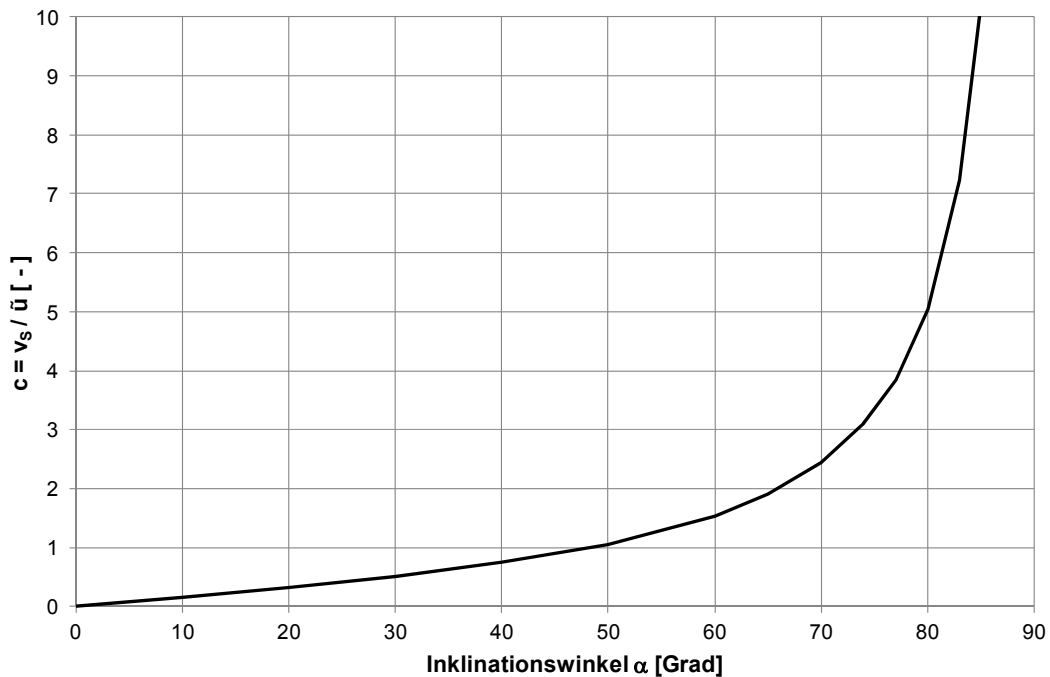


Abb. 4.8: Rechnerisches Verhältnis von Inklinationswinkel  $\alpha$  zu relativer Quergeschwindigkeit  $c$  nach Wang & Odgaard (1993); Beispiel:  $a_x/h_B = 6$

Das berechnete Maximum liegt bei ca.  $90^\circ$  ( $\tan 90^\circ$  ist nicht definiert), also bei dem Winkel, bei dem gemäß dem in Kapitel 3.4 erläuterten Prinzip der Sekundärströmungsentstehung keine Sekundärströmung auftritt. Bereits bei relativ kleinen Inklinationswinkeln (im Beispiel Abb. 4.8 bereits bei etwa  $50^\circ$ ) nimmt  $c$  einen Wert größer als 1 an, die oberflächennahe Querströmung ist folglich rechnerisch größer als die Längsgeschwindigkeit, was physikalisch nicht möglich ist. Nur bei kleinen Winkeln, wie sie vom IIHR für Leitelemente empfohlen werden, liefert das Berechnungsverfahren plausible Ergebnisse.

#### 4.4.2 Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung über die Tiefe

Die Laboruntersuchungen von Wang & Odgaard (1993) machten auch deutlich, dass das Geschwindigkeitsmaximum im Einbaubereich der Vanes durch die induzierte Sekundärströmung wie in einer Flusskrümmung in Richtung Sohle wandert. Zur Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung wurde das Potenzgesetz (Kapitel 2.3.3, Gl. 2.19) daher durch einen Term zur Berücksichtigung des Einflusses der Vanes ergänzt:

$$\frac{u(z)}{\tilde{u}} = \frac{m_o + 1}{m_o} \cdot \left( \frac{z}{h} \right)^{1/m_o} + 0.6 \cdot \alpha \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{h} \right) \quad \text{Gl. 4.16}$$

Auch bei dieser ebenfalls auf der linearen Tragflächentheorie aufbauenden Formel wird deutlich, dass sie zur analytischen Beschreibung der durch Lenkbuhnen hervorgerufenen Veränderungen ungeeignet ist. Mit ihr durchgeführte Berechnungen ergeben z.B. für einen Inklinationswinkel  $\alpha = 90^\circ$ , bei dem keine Sekundärströmungen auftreten, mitunter weit größere Veränderungen als bei kleineren Winkeln, bei denen eine Sekundärströmung induziert wird.

Auch dieses Ergebnis ist physikalisch nicht begründbar und zeigt den stark beschränkten Gültigkeitsbereich der am IIHR entwickelten Formeln auf.

Zur Verbesserung der Theorie des IIHR sieht van Zwol (2004) eine Möglichkeit in der Einbindung der nichtlinearen Tragflächentheorie (Kapitel 4.3). Mit ersten Vergleichsrechnungen konnten bereits Verbesserungen aufgezeigt werden, sie beschränkten sich jedoch auf einen Inklinationswinkel von  $20^\circ$ , also einen Bereich, der weit von typischen Winkeln bei Lenkbuhnen entfernt ist. Dennoch soll die nichtlineare Tragflächentheorie im Folgenden kurz vorgestellt werden.

#### 4.5 Nichtlineare Tragflächentheorie

Flügel mit kleinem Seitenverhältnis sind üblicherweise durch scharfe Vorderkanten gekennzeichnet, an denen sich die Strömung in eindeutig kontrollierter Weise ablöst. Die Ablöselinie ist damit fest in der Vorderkante verankert. Die Strömungsablösung führt zur Bildung eines Wirbelbandes über dem Flügel, das sich entlang der Kante aufrollt (Abb. 4.9a). Diese Strömung ist stationär, stabil und vorhersagbar (Prandtl et al. 1993).

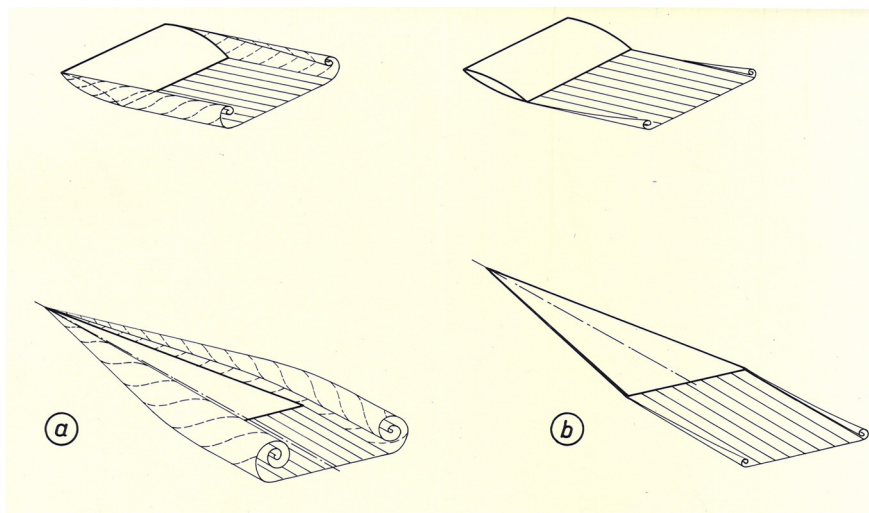


Abb. 4.9: Entstehung von Wirbelflächen bei Rechteckflügeln (oben) und Deltaflügeln (unten); a) großer Anstellwinkel (nichtlineare Theorie) und b) kleiner Anstellwinkel (lineare Theorie) (Gersten 1960)

Flügel mit kleinem Seitenverhältnis sind nicht mehr durch eine lineare Beziehung zwischen dem Auftriebsbeiwert  $c_L$  und dem Anstellwinkel  $\alpha$  (Kapitel 4.1) gekennzeichnet, sondern es treten zusätzlich zu dem linearen Anteil weitere Anteile gleicher Größenordnung auf, die quadratisch von  $\alpha$  abhängen (Abb. 4.10; Gersten 1957, Gersten 1960).

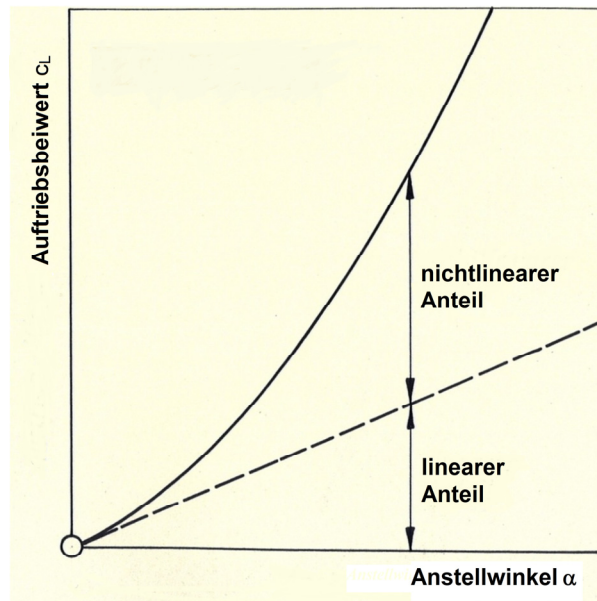


Abb. 4.10: Nichtlineare Charakteristik zwischen Anstellwinkel  $\alpha$  und Auftriebsbeiwert  $c_L$  bei Tragflügeln mit kleinem Seitenverhältnis (Gersten 1960, modifiziert)

Der nichtlineare Anteil gewinnt immer mehr an Bedeutung, je kleiner das Seitenverhältnis wird. Bei Seitenverhältnissen von etwa  $\Lambda = 1$  und Anstellwinkeln von 15 bis 20° liegt er bereits in der gleichen Größenordnung wie der lineare Anteil und kann daher nicht mehr vernachlässigt werden (Gersten 1960). Abb. 4.11 zeigt dieses nichtlineare Verhalten für Rechteckflügel mit Seitenverhältnissen von  $\Lambda = 0.2$  bis 5.0.

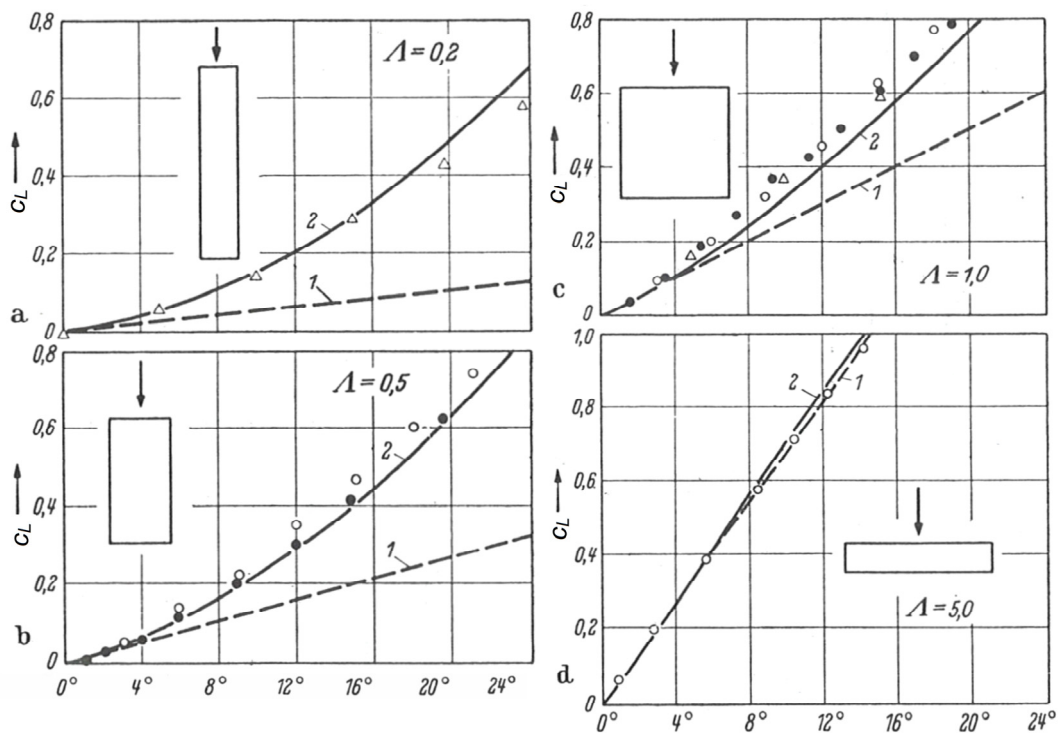


Abb. 4.11: Gemessene Auftriebsbeiwerte  $c_L$  in Abhängigkeit vom Anstellwinkel  $\alpha$  für Rechteckflügel mit Seitenverhältnissen  $\Lambda$  (hier: Spannweiten-Tiefen-Verhältnissen) von 0.2 bis 5; Kurve 1: lineare Theorie, Kurve 2: nichtlineare Theorie nach Gersten (Gersten 1960, modifiziert)

Unter Anwendung der nichtlinearen Tragflächentheorie können die Strömungsvorgänge an Leitelementen ggf. besser beschrieben werden als mit der linearen Theorie. Sie gilt für Flügel mit kleinem Seitenverhältnis und ist damit für Leitelemente tendenziell geeignet. Nichtsdestotrotz ist auch ihre Anwendung auf relativ kleine Anstellwinkel begrenzt. So wurden z.B. die der Theorie zugrunde liegenden Messungen von Gersten (1960) auf Winkel bis  $24^\circ$  beschränkt (Abb. 4.11). Die Ergebnisse von Mærelus & Sinha (1998), bei denen der Drehimpuls bis zu einem Inklinationswinkel von  $40^\circ$  anstieg und danach wieder abnahm, lassen sich auch über die nichtlineare Theorie nicht begründen, nach der der Auftriebsbeiwert mit dem Winkel immer weiter ansteigt.

#### **4.6 Fazit**

Die zitierten Untersuchungen und durchgeführten Beispielrechnungen verdeutlichen, dass die Leitelementtheorie des IIHR nur in einem sehr kleinen Bereich der Bemessungsparameter Gültigkeit besitzt. Liegen die gewählten Parameter außerhalb dieses Bereichs, weichen die über die Theorie berechneten Größen (z.B. Quergeschwindigkeit, induzierter Drehimpuls, Auftriebs- und Scherkräfte) in der Regel stark von den gemessenen ab. Die Leitelementtheorie ist damit auch für Lenkbahnen, deren Anordnung und Geometrie sehr stark von den Vorgaben des IIHR abweicht, ungeeignet.

Durch die Einbindung der nichtlinearen Tragflächentheorie in die Leitelementtheorie des IIHR, wie von van Zwol (2004) für Leitelemente in Betracht gezogen, ist insbesondere für Lenkbahnen keine Verbesserung zu erwarten. Auch bei der nichtlinearen Theorie ist der Anwendungsbereich stark eingeschränkt. Die typischen Anordnungen und Geometrien der Lenkbahnen liegen jedoch weit außerhalb des Anwendungsbereichs, in dem die nichtlineare Tragflächentheorie noch Gültigkeit besitzt.

Als Ziel der Arbeit wurde die Entwicklung wissenschaftlich fundierter und praxisnaher Bemessungsansätze für Lenkbahnen zum Uferschutz genannt (Kapitel 1.2). Wie die vorangegangenen Erläuterungen zeigen, muss die Entwicklung dieser Ansätze losgelöst von den Tragflächentheorien erfolgen.

Zur Entwicklung der Bemessungsansätze muss zunächst ein umfangreiches Prozessverständnis entwickelt werden. Insbesondere muss der Einfluss der Lenkbahnanordnung und -geometrie auf das Strömungsbild und dabei vor allem die Geschwindigkeitsverteilung und daraus resultierende hydraulische Belastungen der Ufer bekannt sein. Dieses Prozessverständnis wurde mit Hilfe der im Folgenden beschriebenen Laboruntersuchungen erarbeitet.

## 5 Laboruntersuchungen

### 5.1 Versuchsaufbau

#### 5.1.1 Versuchsrinne

Die experimentellen Untersuchungen wurden in einer stufenlos von 0 bis 1.5% neigbaren Kipprinne des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Die Rinne war 20 m lang, 0.90 m breit und 0.60 m tief, ihre Wände bestanden beidseitig aus Glas. Die Regulierung des Abflusses erfolgte über einen Schieber am Zulauf zur Rinne, die der Fließtiefe über eine Wehrklappe am Ende der Rinne.

Mit den Rinnenversuchen sollten grundlegende und allgemeingültige Erkenntnisse zum Einfluss von Lenkbuhnen auf die Strömung gewonnen werden. Damit Gefälle, Rauheit, Sohlenbreite, Froudezahl und Fließtiefe beim Versuchsaufbau jedoch in einem sinnvollen Verhältnis zueinander stehen, orientierte sich die Größe der genannten Parameter an einem konkreten Gewässerabschnitt. Gewählt wurde ein etwa 370 m langer grader Abschnitt (km 2+078 bis 1+709) des Schwarzwaldflusses Wiese im Stadtgebiet von Lörrach, die sogenannte „Rossschwemme“, wo im Jahr 2007 im Rahmen eines Pilotprojekts die ersten Lenkbuhnen in Deutschland umgesetzt wurden (Mende & Koll 2008). Die Kennzahlen dieses Abschnitts können Tab. 5.1 entnommen werden. Der Versuchsaufbau entspricht einem modifizierten und stark vereinfachten Halbmodell dieses Wieseabschnitts im Maßstab 1:18.



Abb. 5.1: Schwarzwaldfluss Wiese im Bereich der Rossschwemme vor dem Einbau von Lenkbuhnen (Foto: Koll 2006)



Tab. 5.1: Wesentliche Kennzahlen des Schwarzwaldflusses Wiese im Bereich der Rossschwemme (km 2+078 bis 1+709)

Parameter			Quelle
Sohlenbreite	$b_{So}$	18.0 m	Mende & Koll (2008)
Sohlengefälle	$l_0$ [‰]	2.7 ‰	Lengnick & Krauter (2005)
Mittlerer Korndurchmesser Deckschicht	$d_{m,Dx}$	126 mm	Koll (2002)
Fließtiefe bei $HQ_{100}$	$h_{HQ100}$	3.3 ÷ 3.6 m	Lengnick & Krauter (2005)
Froude-Zahl bei $HQ_{100}$	$Fr_{HQ100}$	0.53 ÷ 0.54	Lengnick & Krauter (2005)

Für die Untersuchungen wurde ein Gefälle von 2.5‰ eingestellt. Die lichte Rinnenbreite wurde mit glatten, in Fließrichtung links eingebauten Betonfertigteilen auf 50 cm verkleinert und entspricht damit 1/18 der halben Sohlenbreite der Wiese (vgl. Tab. 5.1). Lokal wurde statt der Betonfertigteile ein glatter Holzverbau verwendet, der nach Abschluss der hier beschriebenen Untersuchungen mit festen Wandungen für nachfolgend vorgesehene Versuchsreihen mit beweglichen Ufern einfach ausgebaut werden konnte.

Im Einlaufbereich der Rinne wurden Strömungsgleichrichter aus Kunststoffrohren mit einem Durchmesser von 3 cm eingebaut, um einen quasi querströmungsfreien Zulauf zu gewährleisten (Abb. 5.2 links).



Abb. 5.2: Strömungsgleichrichter im Zulaufbereich der Versuchsrinne (links); raue Sohle der Versuchsrinne (rechts)

Als Sohle der Versuchsrinne wurden wasserfeste Holzplatten eingebaut, auf die mit einer Schlammmasse Kies mit einer Körnung von 4 bis 11.2 mm aufgeklebt wurde (Abb. 5.2 rechts). Die Wahl der Körnung orientierte sich wiederum an der Wiese in Lörrach, deren Deckschicht einen mittleren Korndurchmesser von  $d_{m,Dx} = 126$  mm (Tab. 5.1) aufweist. Bei einem Modellmaßstab von 1:18 entspricht dies einem Durchmesser von 7.0 mm.

## 5.1.2 Variierte Parameter

### 5.1.2.1 Lenkbuhnenanordnung und -geometrie

Auf die Sohle der Versuchsrinne wurden linksseitig aus wasserfestem Holz gefertigte Lenkbuhnen mit horizontalem Rücken und halbkreisförmigem Kopf aufgeschraubt. Die mit Dichtungsband beklebte Unterseite der Buhnen ermöglichte einen weitgehend wasserdichten Anschluss an die raue Sohle und glich Unebenheiten aus. Die gewählte Lenkbuhnenbreite  $b_B = 6 \text{ cm}$  (Abb. 5.3) entsprach bei dem gewählten Maßstab von 1:18 in der Natur einer Breite von ca. 1.10 m und lag damit in einem Bereich, wie er bei Lenkbuhnen aus großen Blocksteinen zu erwarten ist. Die Lenkbuhnenhöhe betrug  $h_B = 2 \text{ cm}$ , was in der Natur einer Höhe von 36 cm entspricht. Die Höhe lag damit in der Größenordnung, wie sie von der Baubezirksleitung Bruck an der Mur für größere Fließgewässer gewählt wird.

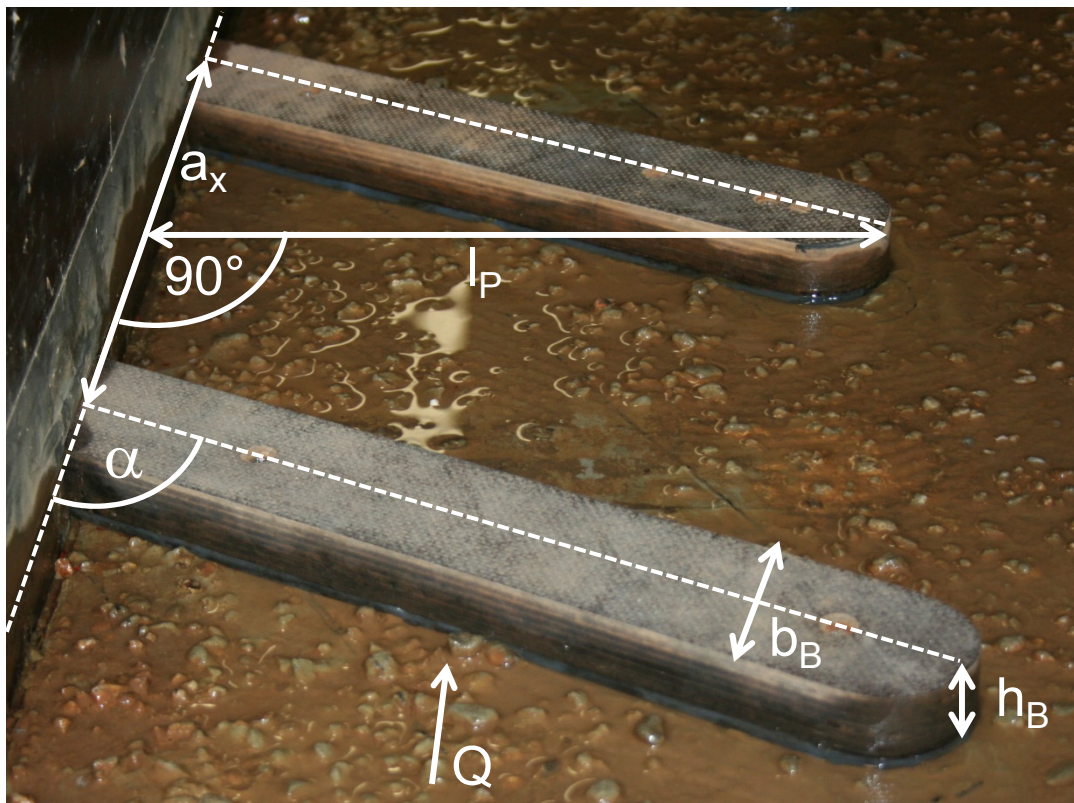


Abb. 5.3: In den Laboruntersuchungen verwendete Lenkbuhnen

Variiert wurden die Parameter Lenkbuhnenabstand  $a_x$  (gemessen von Lenkbuhnenachse zu -achse), Inklinationswinkel  $\alpha$  und die auf die y-Achse der Rinne projizierte Lenkbuhnenlänge  $l_p$  (Abb. 5.3). Durch die Verwendung der projizierten anstelle der wahren Länge ist der „Verbauungsgrad“ unabhängig vom Inklinationswinkel. Der Verbauungsgrad entspricht dem Verhältnis der durch die Lenkbuhne verbauten zur unverbauten Querschnittsfläche. Da die Rauheitswirkung der Buhne und damit der Wasserspiegelanstieg wesentlich vom Verbauungsgrad abhängen, lassen sich Änderungen des Wasserstands und der Längs- und Quergeschwindigkeitsverteilung somit unmittelbar auf den geänderten Inklinationswinkel zurück führen und werden nicht von einem, sich mit dem Inklinationswinkel ändernden Verbauungsgrad überlagert.



Tab. 5.2: Variierte Lenkbunnenparameter

<b>Projizierte Länge <math>l_p</math> [cm]</b>	<b>Achsabstand <math>a_x</math> [cm]</b>	<b>Inklinationswinkel <math>\alpha</math> [Grad]</b>
10	30	30
20	60	60
30	90	90

Die Lenkbunnenparameter wurden in einer großen Bandbreite variiert (Tab. 5.2), da mit dem beschränkten Wissen zu Lenkbunnen eine sinnvolle Einschränkung des Variationsbereichs nicht möglich war. Insgesamt wurden  $3 \times 3 \times 3 = 27$  Parameterkombinationen untersucht (s.a. Anhang 1). Auf deklinante Anordnungen ( $\alpha > 90^\circ$ ) wurde verzichtet, da das übergeordnete Ziel der Untersuchungen eine Verbesserung des Uferschutzes ist. Aus den Untersuchungen und Erfahrungen mit Leitelementen und auch mit Uferschutzbunnen lässt sich jedoch ableiten, dass bei deklinanten Lenkbunnen mit einer verstärkten Uferbelastung zu rechnen ist.

Die Lenkbunnen wurden in Fließrichtung links über eine Strecke von drei Metern eingebaut. Beim kleinsten Abstand  $a_x = 30$  cm wurden folglich 11 Bunnen eingebaut (Abb. 5.4). Unabhängig vom Abstand blieb bei allen Versuchen mit gleicher projizierter Länge und gleichem Inklinationswinkel die erste Buhne stehen. Bei Versuchen mit größeren Abständen wurde nur jede zweite ( $a_x = 60$  cm) bzw. jede dritte Lenkbuhne ( $a_x = 90$  cm) eingebaut, dies entspricht 6 bzw. 4 Bunnen.

Mit der Wahl eines relativ langen Einbaubereichs mit zahlreichen Lenkbunnen wurde das Ziel verfolgt, in Analogie zu den Versuchen von Wang & Odgaard (1993) im unteren Lenkbunnenbereich eine voll entwickelte Sekundärströmung zu erzeugen (vgl. Kapitel 4.4).

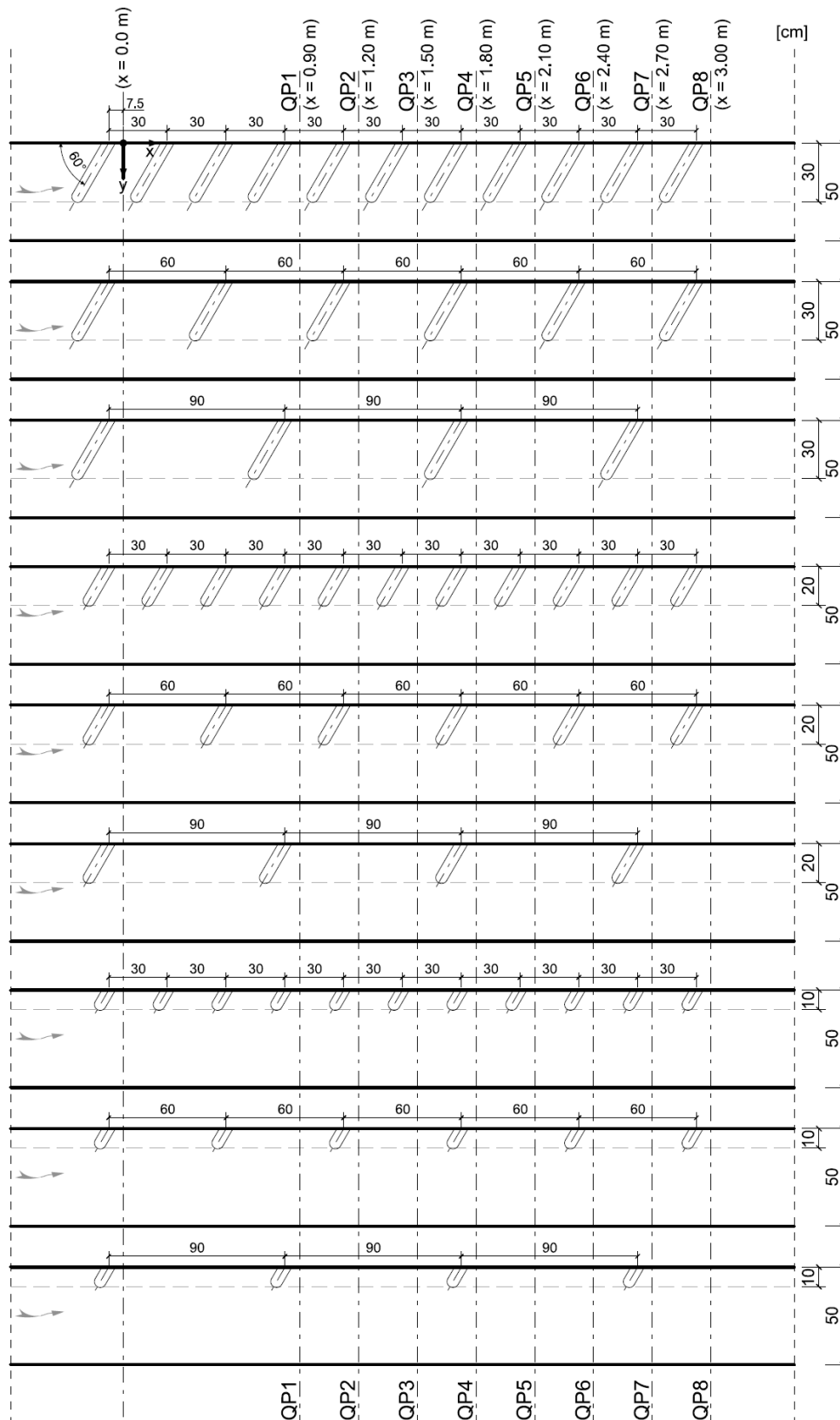


Abb. 5.4: Untersuchte Lenkbuhnenanordnungen bei einem Inklinationswinkel  $\alpha = 60^\circ$  mit Lage der Messprofile

### 5.1.2.2 Fließtiefe und relative Bauwerkshöhe

Alle 27 Lenkbuhnenanordnungen (Abschnitt 5.1.2.1) wurden bei vier Abflüssen untersucht, bei denen sich ohne Lenkbuhnen die in Tab. 5.3 (S. 68) zusammengestellten Normalabflusstiefen einstellten. Insgesamt umfasste die Versuchsreihe folglich 108 Parameterkombinationen. Die gewählten Fließtiefen entsprachen bei dem zugrunde gelegten Maßstab von 1:18 in der Natur einer Fließtiefe von bis zu 3.6 m, wie sie bei einem hundertjährigen Hochwasserereignis zu erwarten ist (Tab. 5.1). Zur Berechnung der relativen Bauwerkshöhe  $H$  wurde näherungsweise die Normalabflusstiefe verwendet, da die genaue Fließtiefe nach Einbau der Lenkbuhnen im Vorfeld nicht bestimmt werden konnte. Auf die Fließtiefe nach Einbau wird in Kapitel 6.2.3 genauer eingegangen.

Die gewählten relativen Bauwerkshöhen sind mit Werten zwischen  $1/10$  und  $1/4$  wesentlich kleiner als bei allen anderen bisherigen Untersuchungen zu überströmten Buhnen (vgl. Kapitel 3.7).

### 5.1.3 Messungen

Der **Abfluss** in der Rinne wurde über ein induktives Durchflussmessgerät (IDM) gemessen, das der Rinne vorgeschaltet war.

Die Messung der **Wasserstände** erfolgte über 8 Staurohre, die entlang der orographisch rechten Rinnenwand im Abstand von etwa einem Meter angeordnet waren. Die Staurohre wurden so angeordnet, dass die Messung vor, im und hinter dem eingebauten Lenkbuhnenfeld erfolgen konnte. Die Rohre waren mit einer Standrohrharfe verbunden, an der der Wasserstand in der Versuchsrinne mit Hilfe eines Stechpegels bestimmt wurde.

Zur Messung der **Fließgeschwindigkeit** wurden eine seitlich messende 2D- und eine vertikal messende 3D-ADV-Sonde der Firma Nortek verwendet. Die Vorteile dieser akustischen Strömungsmessgeräte liegen in der hohen Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung (Abweichung laut Voulgaris & Trowbridge (1998)  $\pm 1\%$ ), der relativ einfachen Handhabung und der quasi störungsfreien Geschwindigkeitsaufzeichnung, da der durch das Messinstrument verursachte hydraulische Widerstand am Messpunkt vernachlässigbar klein ist (Nikora & Goring 1998).

Bei ADV-Sonden wird der Doppler-Effekt zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit genutzt. Als Doppler-Effekt bezeichnet man die Veränderung der Frequenz und der Wellenlänge eines Signals, wenn sich die Schallquelle und der Schallempfänger relativ zueinander bewegen (Sontek 2001). Die Sonden senden durch einen mittigen Schallgeber kurze Ultraschallimpulse in ein Kontrollvolumen, das sich bei Norteksonden in einem festen Abstand von 5 cm zum Schallgeber befindet (Nortek 2000). Im Kontrollvolumen wird der vom Schallgeber ausgesendete Impuls durch Schwebstoffe und kleine Luftblasen reflektiert. Radial um den Schallgeber sind Empfänger angeordnet, die den reflektierten Impuls wieder aufnehmen. 2D-Sonden besitzen zwei Schallempfänger, 3D-Sonden entsprechend drei. Die Schallempfänger befinden sich in einem Winkel von  $180^\circ$  (2D) bzw.  $120^\circ$  (3D) zueinander (Abb. 5.5).

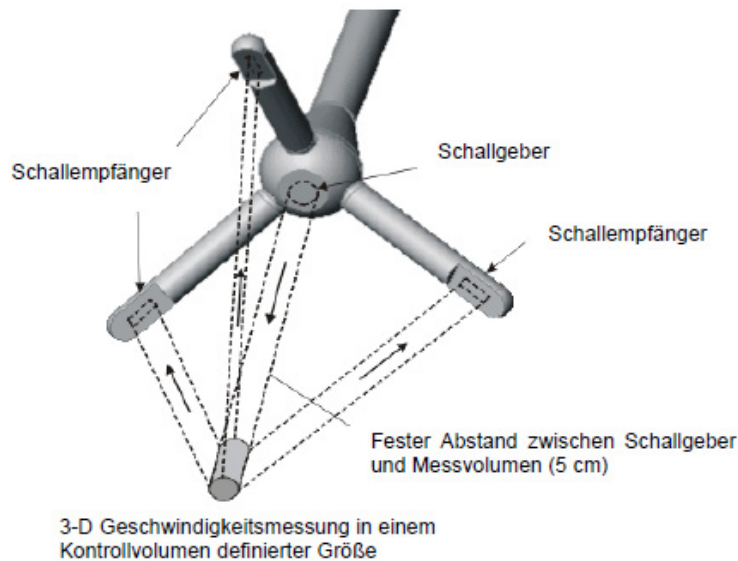


Abb. 5.5: Sensor und Signalwege eines 3D-ADV (SonTek 2007)

Da sich das Kontrollvolumen bei der vertikal messenden 3D-Sonde unter dem Schallgeber befindet und die Sonde bei der Messung vollständig eintauchen muss, ist sie zur Messung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten nicht geeignet. Für die oberflächennahen Messungen wurde daher die seitlich messende 2D-Sonde eingesetzt. Sie wurde so gedreht, dass die beiden Empfänger in Fließrichtung lagen und somit die Strömung im Kontrollvolumen nicht nennenswert beeinflusst wurde.

Die Sonden wurden nacheinander auf einem programmierbaren Messwagen montiert, der die festgelegten Messpunkte automatisch abfuhr. Abhängig von der Fließtiefe und der montierten Sonde wurden hierzu unterschiedliche Steuerungsprogramme verwendet. In jedem Messpunkt wurde eine 60-sekündige Messung mit 25 Hertz durchgeführt. Aus den daraus resultierenden 1500 Einzelwerten für jede gemessene Geschwindigkeitskomponente wurden mit der gängigen ADV-Auswertungssoftware WinADV32 (Version 2.028) Mittelwerte gebildet.

#### 5.1.3.1 Standardmessraster

Der Messbereich des „Standardmessrasters“ (Abb. 5.4, Anhang 1 und 2) umfasste mit einer Länge von 2.10 m den gesamten Arbeitsbereich des Messwagens und begann 97.5 cm unterstrom des Punkts, an dem die Längsachse der ersten Lenkbühne auf die Wand trifft (Abb. 5.7 unten). Bei kleinstem Bühnenabstand ( $a_x = 30$  cm) begann der Messbereich damit direkt unterhalb der vierten Bühne. Durch die Lenkbühnen oberstrom des Messbereichs konnte im unteren Messbereich eine annähernd voll entwickelte Sekundärströmung erwartet werden.

Um auch die Entstehung und Entwicklung der Sekundärströmung untersuchen zu können, wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem das erste Messprofil 22.5 cm oberhalb der Bühnenwurzel (Bezug: Bühnenlängsachse) der ersten Bühne lag (Abb. 5.7 oben). Bei diesem Versuch wurden die oberen vier Lenkbühnen ausgebaut und unterstrom des bestehenden Bühnenbereichs mit gleichbleibendem Abstand eingebaut. Somit mussten keine aufwändigen Umbaumaßnahmen am Messwagen durchgeführt werden.

Die Fließgeschwindigkeit wurde in acht Querprofilen mit einem Abstand von 30 cm gemessen, das erste und letzte bildete die obere bzw. untere Grenze des Messbereichs. Das Querprofil direkt unterhalb der ersten Buhne wurde als  $x = 0$  cm definiert. Die Messungen umfassen folglich die Bereiche von  $x = 90$  bis 300 cm bzw.  $x = -30$  bis 180 cm. In den Querprofilen wurden horizontale Messebenen festgelegt. Die unterste Messebene befand sich in einem Abstand von 2 cm über der Sohle und lag damit auf Lenkbuhnenhöhe, die weiteren Messebenen folgten in Abständen von 4 cm (Abb. 5.6). Da die Querprofile direkt unterhalb der Buhnen lagen, erfolgte keine Messung auf bzw. über der Buhne. Je nach Fließtiefe (Tab. 5.3) ergaben sich damit 2 bis 5 Messebenen, wobei die oberste Messebene bei allen untersuchten Normalabflüssen 2 cm unter der Wasseroberfläche lag (Anhang 2). Die Fließgeschwindigkeiten in den oberen beiden Messebenen wurden aus oben genannten Gründen in der Regel mit der 2D-ADV-Sonde gemessen. Bei einzelnen Versuchen wurde in der zweiten Ebene vom Wasserspiegel aus auch mit der 3D-ADV-Sonde gemessen, um zusätzlich die Fließgeschwindigkeit in z-Richtung zu erfassen. Die Messergebnisse konnten in diesem Fall jedoch nur teilweise verwendet werden, da die Messung aufgrund der Nähe der Sonde zur Wasseroberfläche des Öfteren durch Luftblasen gestört wurde.

Auf Messebenen, in denen mit der 3D-Sonde gemessen werden konnte, lagen 5 Messpunkte. Musste die nach links ausgerichtete seitlich messende 2D-Sonde verwendet werden, konnte der am weitesten rechts liegende Messpunkt nicht mehr mit dem Messwagen angesteuert werden, weshalb die Fließgeschwindigkeitsmessungen hier nur in 4 Messpunkten durchgeführt werden konnten. Die Messpunkte der einzelnen Ebenen lagen senkrecht übereinander, was auch eine Auswertung als Messvertikalen (Abb. 5.6) erlaubte. Der geringste Abstand einer Vertikalen zur linken Wandung, an der auch die Lenkbuhnen eingebaut wurden, betrug 3 cm. Dies ist der kleinstmögliche Abstand, der mit einer 3D-ADV-Sonde gemessen werden kann. Die weiteren Vertikalen befanden sich in einem Abstand von 8, 20, 32 und 40 cm zur Wandung. Durch die erhöhte Zahl der Messpunkte in der Nähe der Wandung konnten die Strömungsverhältnisse in diesem Bereich besonders genau erfasst werden. Da die Fließgeschwindigkeiten in Ufernähe für die auf das Ufer wirkenden Strömungskräfte ausschlaggebend sind, lässt ihre detaillierte Erfassung eine Aussage zur lenkbuhnenbedingten Entlastung der Ufer zu.

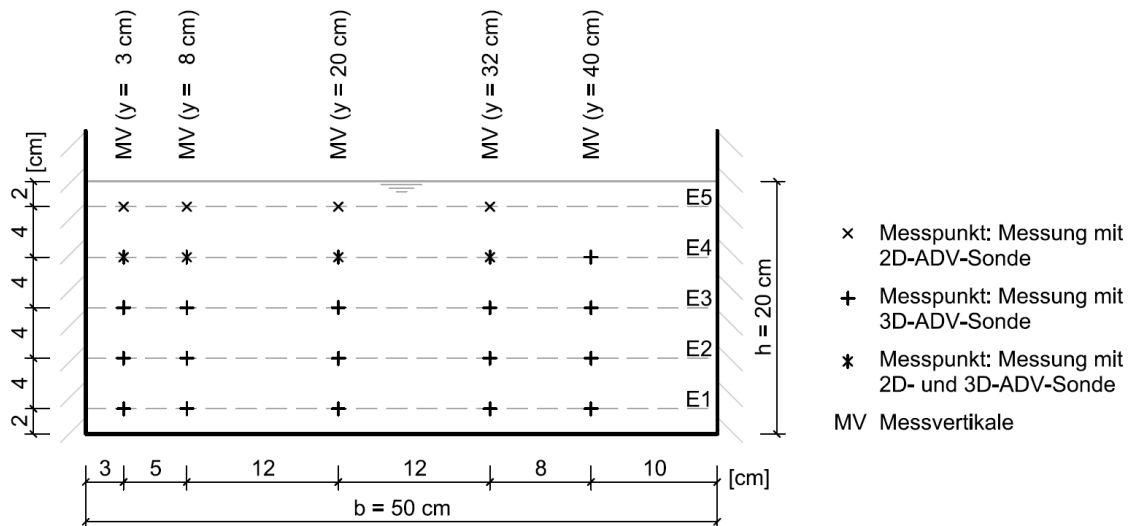


Abb. 5.6: Querprofil mit Messpunkten des Standardmessrasters

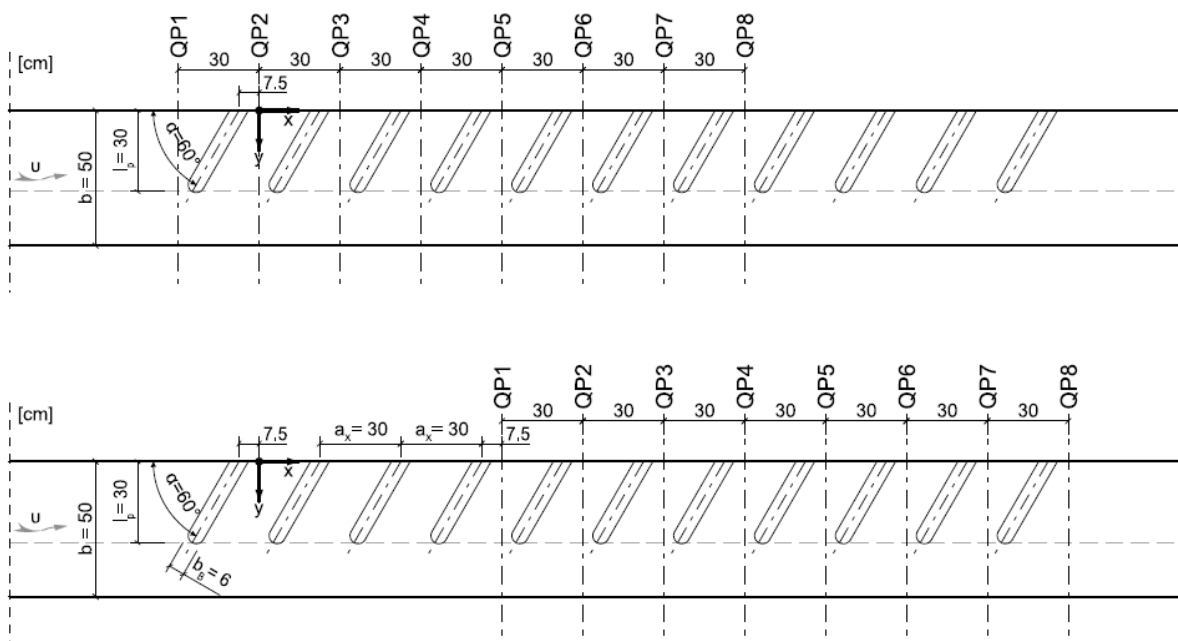


Abb. 5.7: Lage der Messprofile beim Standardmessraster

### 5.1.3.2 Messraster eng

Nach Durchführung und erster Auswertung der Versuchsreihen mit dem Standardmessraster wurden für ausgewählte Versuchsanordnungen zusätzliche Messungen mit einem engen Messraster und einem Querprofilabstand von nur 5 cm durchgeführt. Der Messbereich erstreckte sich in Fließrichtung über eine Länge von 1.0 m, folglich wurden in 21 Querprofilen Messungen durchgeführt. Jedes Querprofil beinhaltete 84 Messpunkte. Der Messbereich lag im mittleren Bereich der Lenkbahnenstrecke ( $x = 110$  bis  $210$  cm). Mit Hilfe der Messungen mit engem Raster sollten zusätzliche und detailliertere Erkenntnisse zur Induzierung von

Sekundärströmungen durch Lenkbuhnen und ihren Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung gewonnen werden.

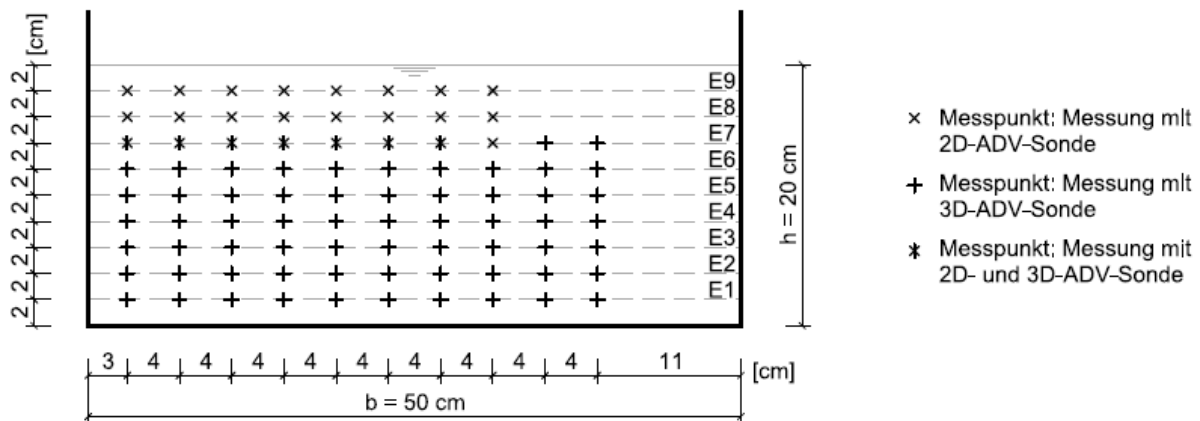


Abb. 5.8: Querprofil mit Messpunkten des Messrasters eng

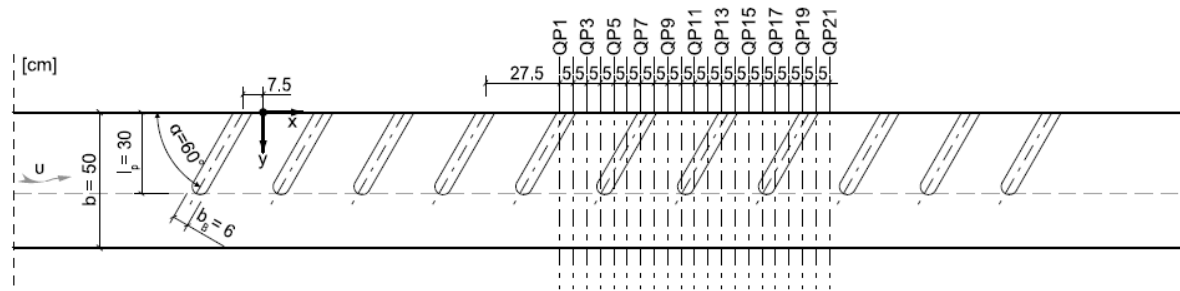


Abb. 5.9: Lage der Messprofile beim Messraster eng

## 5.2 Versuchsdurchführung

### 5.2.1 Vorversuche ohne Lenkbuhnen

Vor der Versuchsdurchführung mit Lenkbuhnen wurde zunächst eine Messreihe ohne Buhnen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messreihe wurden später als Vergleichswerte den Messungen mit Lenkbuhnen gegenübergestellt, womit sich der Einfluss der Lenkbuhnenanordnung- und -geometrie auf die Längs- und Quergeschwindigkeitsverteilung und den Wasserstand ermitteln ließ. Außerdem dienten sie zur Rauheitsbestimmung der Versuchsrinne (Kapitel 6.2.3).

Die Messreihe umfasste vier Versuche bei Normalabfluss, der mit Hilfe des Klappenwehres und der Zuflussregelung eingestellt wurde (Tab. 5.3). Nach dem Einstellen und der Überprüfung der gewünschten Normalabflusstiefe  $h_N$  mittels der Staurohre wurde der Messwagen mit der ADV-Sonde gestartet und die im Messraster festgelegten Messpunkte automatisch abgefahren. Die Vorversuche wurden sowohl mit dem Standardmessraster als auch mit dem Messraster eng durchgeführt.

Tab. 5.3: Vom Versuchsdurchfluss abhängige Größen

<b>Q</b> [l/s]	<b>h<sub>N</sub></b> [cm]	<b>H</b> [ - ]	<b>u<sub>m</sub></b> [cm/s]
19.9	8	1/4	50.5
35.3	12	1/6	59.7
56.9	16	1/8	72.1
78.5	20	1/10	79.6

### 5.2.2 Hauptversuche

Bei den Hauptversuchen wurden die Lenkbuhnen im Trockenen in die Rinne eingebaut und die Anordnung und Geometrie nach und nach variiert. Für jede der 27 untersuchten Lenkbuhnenanordnungen (Kapitel 5.1.2.1) wurde eine Messreihe mit den vier in Tab. 5.3 zusammengestellten Abflüssen durchgeführt. Die Klappeneinstellungen entsprachen denen der Vorversuche (Abschnitt 5.2.1), ohne Lenkbuhnen hätte sich Normalabfluss eingestellt.

Nach dem Einbau der Lenkbuhnen und dem Einstellen des Abflusses und der Klappe wurde die Wasserspiegellage wie bei den Vorversuchen aufgenommen und der Messwagen mit der ADV-Sonde gestartet.

### 5.2.3 Versuche mit Sediment

Um Rückschlüsse auf den Einfluss von Lenkbuhnen auf den Geschiebetransport und die Sohlenmorphologie ziehen zu können, wurde bei einer Lenkbuhnenanordnung eine etwa ein Zentimeter dicke Sandschicht auf die feste Sohle gestreut und der Abfluss und die Klappe so eingestellt, dass der Sand stromaufwärts der Lenkbuhnen stabil war, im Einbaubereich der Lenkbuhnen und unterstrom davon jedoch Umlagerungen stattfanden. Die sich einstellende Sohlenmorphologie wurde nach vorsichtiger Entleerung der Rinne fotografiert.

## 5.3 ADV-Filterkriterien

Die Hersteller von ADV-Sonden nennen Grenzwerte, bei deren Einhaltung eine ausreichende Datengüte erreicht wird (Nortek 2000; Sontek 2001). Für die Analyse zeitlich gemittelter Geschwindigkeitswerte soll einerseits ein Signal-Rausch-Verhältnis  $SNR > 5$  dB und andererseits eine Korrelation zwischen gesendetem und empfangenen Signal von  $CORR > 30\%$  eingehalten werden. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden unter Verwendung der ADV-Auswertungsoftware WinADV so gefiltert, dass nur Messungen berücksichtigt wurden, die die oben genannten Grenzwerte einhielten und damit eine ausreichende Datengüte aufwiesen.



## 6 Versuchsergebnisse

Die in den Laboruntersuchungen nachgewiesene Wirkung von Lenkbuhnen und die zugrunde liegenden Prozesse werden in Abschnitt 6.1 für ausgewählte Versuchsanordnungen aufbereitet und weitgehend qualitativ erläutert. Darauf aufbauend folgt in Abschnitt 6.2 die analytische Beschreibung des Einflusses der Lenkbuhnenanordnung und -geometrie auf die Quergeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsverteilung in Längs- und Querrichtung.

### 6.1 Wirkungsmechanismus

#### 6.1.1 Strömungsbild

##### 6.1.1.1 Geschwindigkeitsverteilung

Wie die auf dem Standardmessraster (Kapitel 5.1.3.1) basierenden Isotachendarstellungen verdeutlichen, wird die ohne Lenkbuhnen symmetrische Geschwindigkeitsverteilung (Abb. 6.1a) bei allen Untersuchungen mit Lenkbuhnen und unterschiedlichen Inklinationswinkeln stark verformt.

Besonders ausgeprägt sind die Änderungen bei inklinanter Lenkbuhnenanordnung ( $\alpha = 30^\circ$  und  $60^\circ$ ; Abb. 6.1b und c). Die bei der Nullvariante ohne Lenkbuhnen außerhalb der Wandnähe horizontalen Isotachen verlaufen verstärkt vertikal, d.h. durch die Lenkbuhnen kommt es zu einer Angleichung der Fließgeschwindigkeit über die Tiefe. Dagegen verstärken sich die Unterschiede in der Fließgeschwindigkeit über die Breite, vom Lenkbuhnenkopf zur -wurzel nimmt die tiefengemittelte Geschwindigkeit kontinuierlich ab und ist im Bereich der Buhnenwurzel ( $y = 0 - 10 \text{ cm}$ ) stark reduziert (Abb. 6.2). Am Buhnenkopf und außerhalb der Lenkbuhnen nimmt die Geschwindigkeit zu. Die durch die Lenkbuhnen hervorgerufene Geschwindigkeitsverteilung weist damit Ähnlichkeit mit der in Flusskrümmungen auf, in denen die Geschwindigkeit am Innenufer im Allgemeinen gering ist und zum Prallufer hin zunimmt.

Bei rechtwinkliger Lenkbuhnenanordnung ( $\alpha = 90^\circ$ ; Abb. 6.1d) ist die Änderung der Geschwindigkeitsverteilung weit weniger ausgeprägt als bei inklinanter. Die Isotachen sind gegenüber der Nullvariante verzerrt, verlaufen aber weiterhin annähernd horizontal bzw. fallen zum Buhnenkopf hin leicht ab. Die Fließgeschwindigkeit im Bereich der linken Wandung wird unmittelbar über der Lenkbuhne (ca.  $z = 0 - 10 \text{ cm}$ ) reduziert, nahe der Wasseroberfläche wird die Fließgeschwindigkeit gegenüber der Nullvariante jedoch nicht verringert.

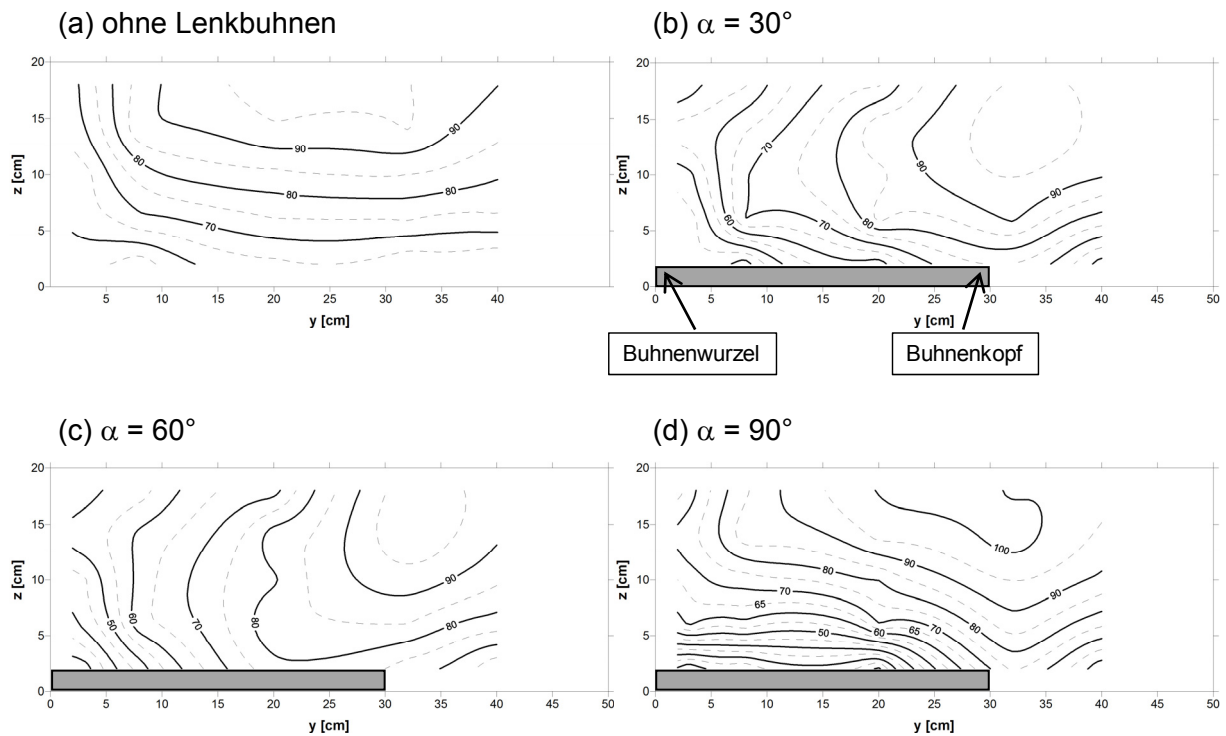


Abb. 6.1: Einfluss des Inklinationswinkels  $\alpha$  auf die Geschwindigkeitsverteilung  $u$  [cm/s] (Beispiel:  $H = 1/10$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm, QP 5 ( $x = 210$  cm))

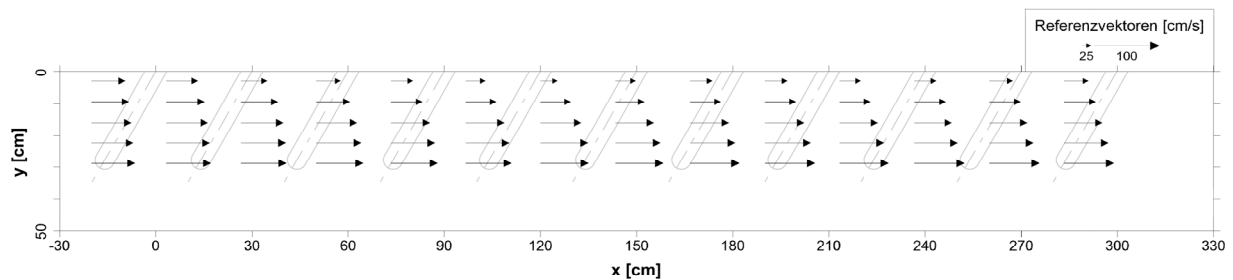


Abb. 6.2: Draufsicht auf die tiefengemittelte Geschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich  $\bar{u}_B$  (Beispiel:  $H = 1/10$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm)

Die oben beschriebene Veränderung der Geschwindigkeitsverteilung durch inklinante Lenkbuhnen entwickelt sich in Fließrichtung. Bereits zu Beginn der Lenkbuhnenstrecke verlaufen die Isotachen nahe der linken Wandung annähernd vertikal, die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit wird hier gegenüber der Nullvariante stark reduziert (Abb. 6.3a). Im weiteren Verlauf erfolgt über den gesamten Lenkbuhnenbereich eine Angleichung der Fließgeschwindigkeiten über die Tiefe, wobei die Geschwindigkeit am Lenkbuhnenkopf zu nimmt (Abb. 6.3b – d). Damit zeigt sich auch hier eine Analogie zu Flusskrümmungen, in deren Verlauf die sohlennahe Geschwindigkeit ebenfalls zunimmt, in diesem Fall im Bereich des Prallufers.

Die Geschwindigkeitsverteilung ändert sich im weiteren Verlauf der Lenkbuhnenstrecke so weit, dass die Geschwindigkeit in der unteren Querschnittshälfte ( $z = 0 \div 10$  cm) im Bereich der beiden rechten Lenkbuhnendrittel ( $y = 10 \div 30$  cm) größer als die oberflächennahe ist. Die Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Buhnenwurzel ( $y = 0 \div 10$  cm) verändern sich dagegen kaum in Fließrichtung. Sowohl die mittlere als auch die maximale Fließgeschwin-

digkeit sind hier über die gesamte Lenkbuhnenstrecke deutlich kleiner als bei der Nullvariante.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die größten Veränderungen der Geschwindigkeitsverteilung in der ersten Hälfte der Lenkbuhnenstrecke ( $x = 0 \div 150$  cm) auftreten. Danach verändert sich die oberflächennahe Lage des Geschwindigkeitsmaximums<sup>1</sup> außerhalb des Lenkbuhnenbereichs ( $y = 30 \div 50$  cm) kaum noch. Gleiches gilt für die wandnahe Geschwindigkeitsverteilung im Lenkbuhnenbereich ( $y = 0 \div 15$  cm).

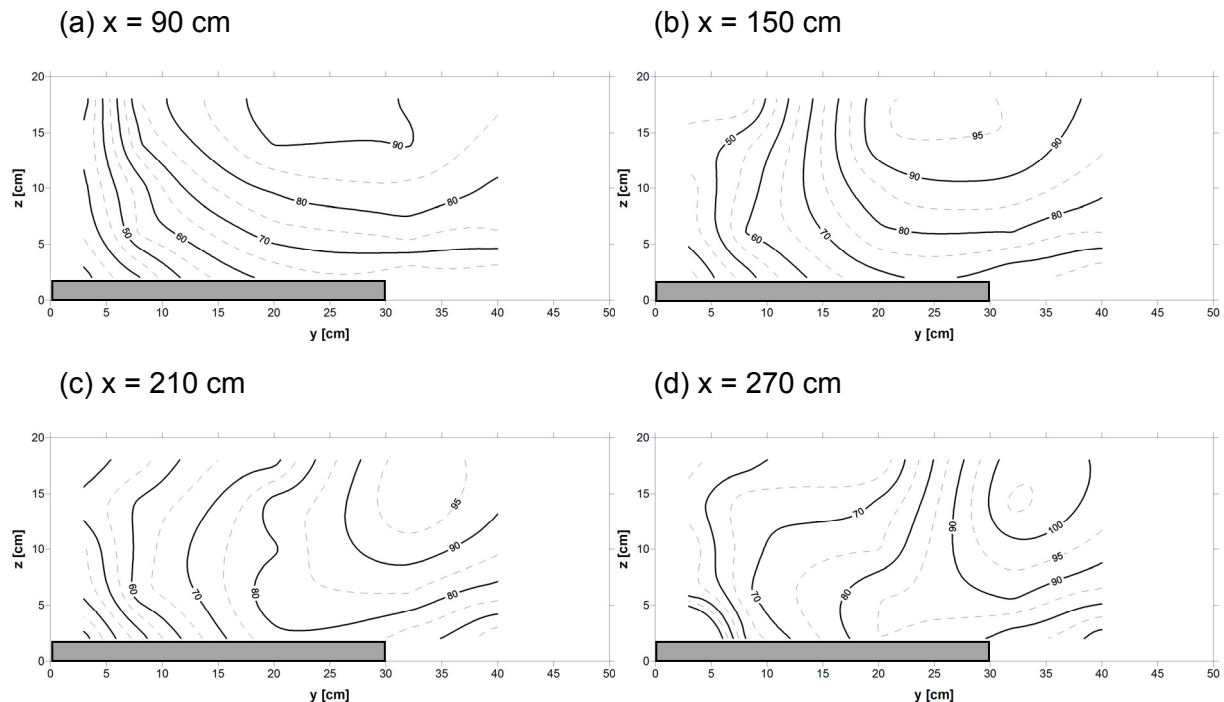


Abb. 6.3: Änderung der Geschwindigkeitsverteilung  $u$  [cm/s] mit dem Fließweg (Beispiel:  $H=1/10$ ,  $\alpha=60^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm)

Inklinante Lenkbuhnen reduzieren die ufernahe Fließgeschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich deutlich. Die daraus resultierende Verringerung des Strömungsangriffs auf das Ufer ist der wesentliche Grund für die in der flussbaulichen Praxis beobachtete uferschützende Wirkung. Im Gegensatz zu inklinanten kann mit rechtwinklig zum Ufer angeordneten Lenkbuhnen keine nennenswerte Verbesserung des Uferschutzes erzielt werden, da die maximale ufernahe Fließgeschwindigkeit nicht verringert wird.

<sup>1</sup> Hinweis: Die Zunahme des Geschwindigkeitsmaximums am Ende der Lenkbuhnenstrecke (ca.  $x = 270$  bis  $300$  cm) ist auf die dort leicht beschleunigte Strömung zurück zu führen.

### 6.1.1.2 Sekundärströmung

Zur Visualisierung von Sekundärströmungen wurden, basierend auf dem Standardmessraster (Kapitel 5.1.3.1), für ausgewählte Versuchsanordnungen eindimensionale Vektordiagramme der gemessenen Quergeschwindigkeiten (Abb. 6.4) sowie zweidimensionale Diagramme unter Berücksichtigung der Quer- und Vertikalgeschwindigkeiten (Abb. 6.5) erstellt. Bei letztgenannten beschränkt sich die Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren auf die Messebenen E1 bis E3 (Abb. 5.6), bei denen mit der 3D-ADV-Sonde gemessen werden konnte.

Die Vektordarstellungen zeigen, dass die Strömung vor Einbau der Lenkbuhnen sekundärströmungsfrei war. Rechtwinklig zur Wandung angeordnete Lenkbuhnen führen zwar zu kleinräumigen Querströmungen mit geringer Geschwindigkeit, sie induzieren jedoch keine Sekundärströmungen (Abb. 6.4d). Die Induzierung von Sekundärströmungen tritt erst bei inklinanten Lenkbuhnen auf. Die Drehrichtung der Sekundärströmung verläuft sowohl bei  $\alpha = 30^\circ$  als auch  $60^\circ$  im Uhrzeigersinn, d.h. an der Sohle ist die Querströmung zur Buhnenwurzel gerichtet (Abb. 6.4b und c).

Die Sekundärströmung entwickelt sich ab der ersten Lenkbuhne ( $x = 0$  cm). Bereits ab etwa  $x = 60$  cm erstreckt sich die Sekundärströmung über die gesamte Fließtiefe und ändert sich dann in Fließrichtung nur noch wenig (Anhang 3). Somit ist der gesamte Messbereich ( $x = 90 \div 300$ ) durch eine annähernd voll entwickelte Sekundärströmung gekennzeichnet. Sie ist über die gesamte Fließstrecke auf den Lenkbuhnenbereich beschränkt.

Die Geschwindigkeit der Sekundärströmung nimmt sowohl nahe der Sohle als auch nahe der Wasseroberfläche vom Lenkbuhnenkopf zur -wurzel hin zu. Sie ist bei  $\alpha = 30^\circ$  geringfügig größer als bei  $60^\circ$ .

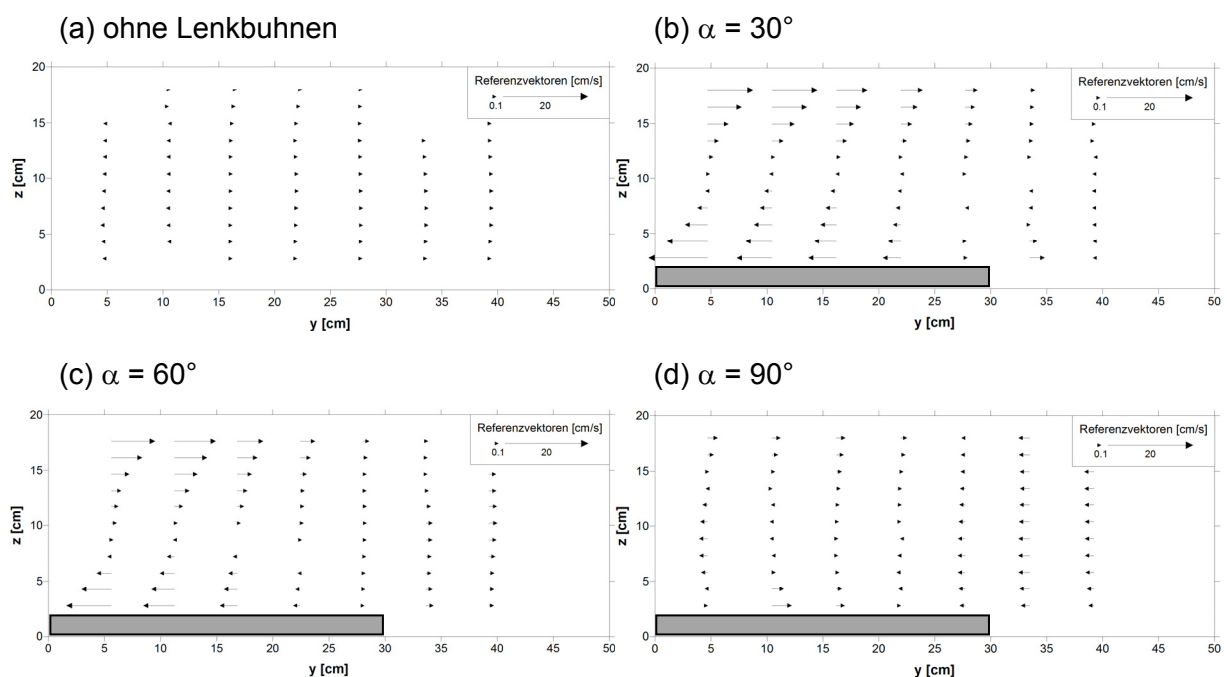


Abb. 6.4: Quergeschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Inklinationswinkel  $\alpha$  (Beispiel:  $H = 1/10$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm, QP 5 ( $x = 210$  cm))

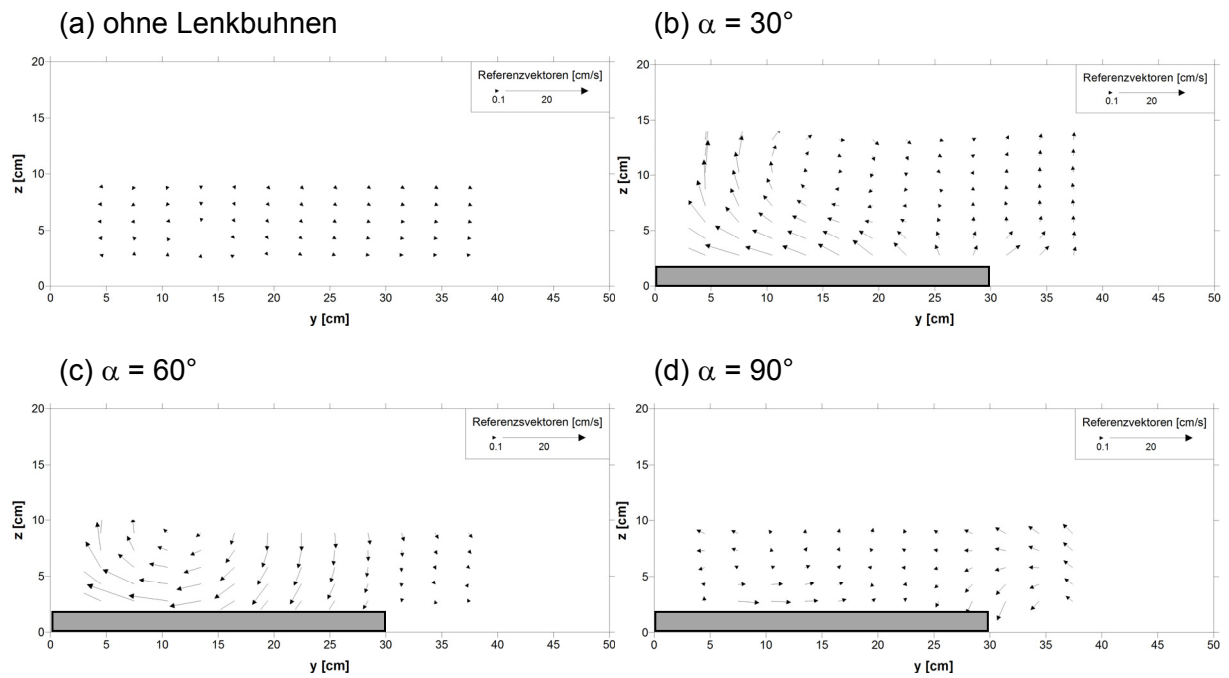


Abb. 6.5: Quer- und Vertikalgeschwindigkeitsverteilung  $v$  und  $w$  in Abhängigkeit vom Inklinationwinkel (Beispiel:  $H = 1/10$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm, QP 5 ( $x = 210$  cm))

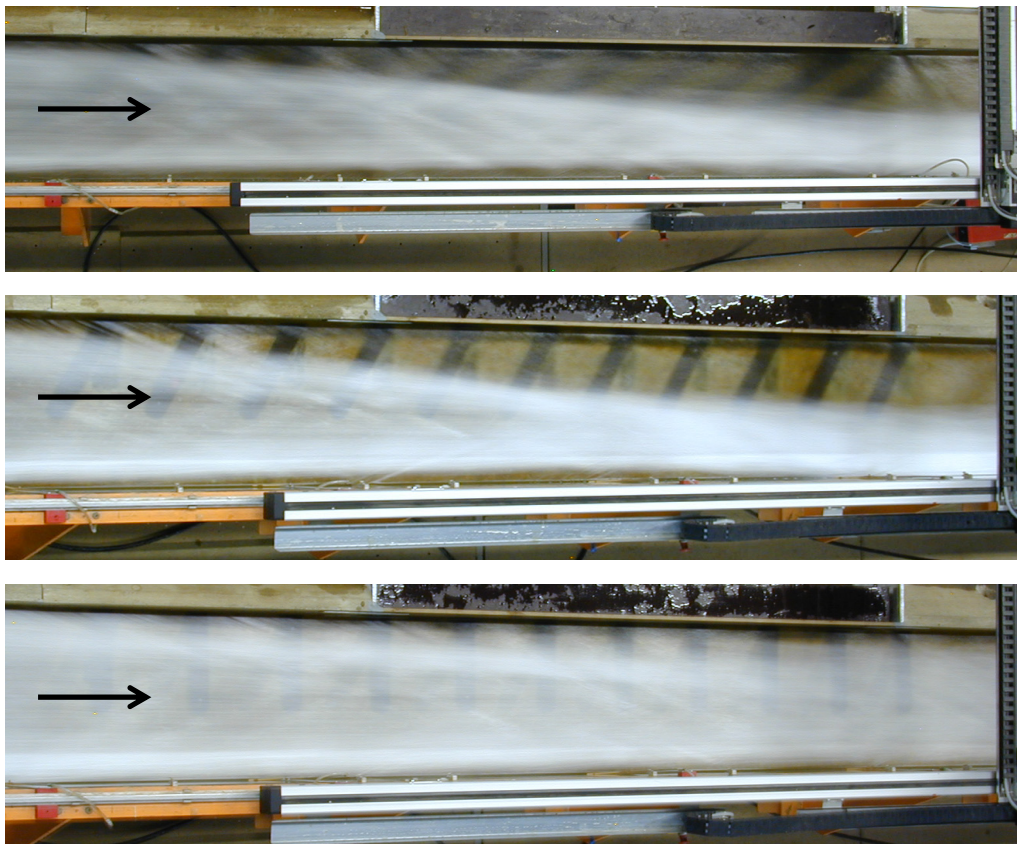


Abb. 6.6: Visualisierte Oberflächenströmung bei  $H = 1/10$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm;  $\alpha = 30^\circ$  (oben),  $60^\circ$  (Mitte),  $90^\circ$  (unten)

Die durch inklinante Lenkbuhnen induzierte Sekundärströmung wurde auch indirekt über die Visualisierung der Oberflächenströmung durch die Zugabe von Papierschnipseln nachgewiesen. Abb. 6.6 zeigt, dass die Schnipsel durch die an der Oberfläche in Richtung Lenkbuhnenkopf verlaufende Sekundärströmung von der linken Wandung weggelenkt werden. Diese strömungslenkende Wirkung trat bei allen untersuchten Fließtiefen auf (s.a. Anhang 4). Bei rechtwinkliger Buhnenanordnung trat dagegen keine lenkende Wirkung auf.

Zusätzlich zur beschriebenen Visualisierung des Strömungsbilds wurde analog zum Vorgehen von Marelius & Sinha (1998) und Gupta et al. (2006) (vgl. Kapitel 4.3) auch der Drehimpuls  $L$  der induzierten Sekundärströmung für alle Messungen mit Standardmessraster (Messbereich  $x = 90 \div 300$  cm) berechnet. Die Berechnung wurde für jede Messvertikale (Abb. 5.6, S. 66) durchgeführt, wobei als Drehpunkt die Mitte der Vertikale gewählt und die Ausdehnung der durch den Drehimpuls beschriebenen Sekundärströmung in Fließrichtung einheitlich auf  $a_x = 1$  cm festgelegt wurde (Abb. 2.2, S. 6). Für jeden Messpunkt auf der Vertikalen erfolgte die Berechnung des Einzeldrehimpulses durch Multiplikation der in dem Punkt gemessenen Quergeschwindigkeit mit dem Abstand zwischen zwei Messpunkten und dem Abstand des Messpunkts zum Drehpunkt. Der Gesamtdrehimpuls ergab sich dann als Summe der Einzeldrehimpulse.

Abb. 6.7 zeigt beispielhaft die Verteilung der Drehimpulse über die Breite für eine ausgewählte Versuchsanordnung mit inklinanten Lenkbuhnen, wobei dem Diagramm mit Hilfe der Legende auch die Lage der den Drehimpulsen zugrunde liegenden Messvertikalen in Fließrichtung ( $x$ -Werte) entnommen werden kann.

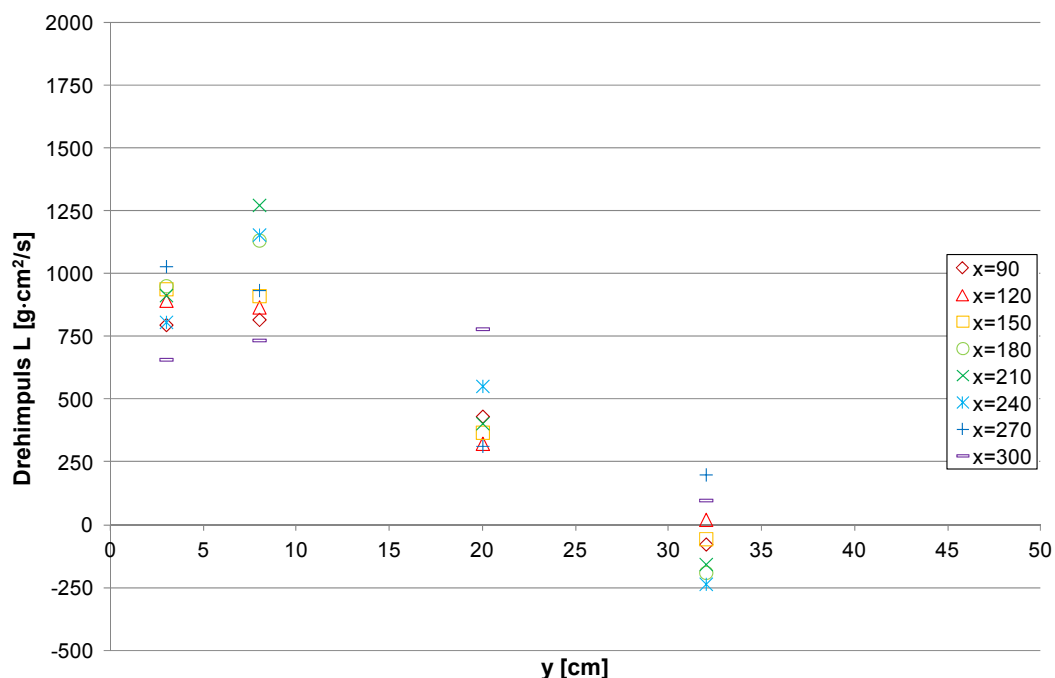


Abb. 6.7: Verteilung der Drehimpulse  $L$  über die Gerinnebreite (Beispiel:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm,  $H = 1/10$ )



Wie aus dem Diagramm deutlich wird, ändern sich die Drehimpulse wie auch die Quergeschwindigkeit über die Rinnenbreite. Sie erreichen nahe der Bühnenwurzel ihr Maximum, wobei die Werte bei  $y = 3$  und  $y = 8$  cm etwa gleich groß sind, und gehen zum Bühnenkopf (hier bei  $y = 30$  cm) hin auf etwa null zurück.

Aus Abb. 6.7 geht auch hervor, dass die Drehimpulse in Fließrichtung in größerem Maße variieren. Dies überrascht zunächst, weil die Sekundärströmung sich ab ca.  $x = 60$  cm in Fließrichtung kaum noch ändert (Kapitel 6.1.1.2). Da bei der Berechnung des Drehimpulses in einer Messvertikalen jedoch die Quergeschwindigkeit mit dem Abstand zum Drehpunkt multipliziert wird, führen bereits relativ kleine Unterschiede bei der Quergeschwindigkeit zu relativ großen Variationen der Drehimpulse. Der Vergleich der Drehimpulse bei unterschiedlichen Versuchsanordnungen zeigt, dass diese Variationen nicht systematisch auftreten. Das heißt, die Größe des Drehimpulses ist in dem untersuchten Messbereich weitgehend unabhängig von der Position in Fließrichtung.

Inklinante Lenkbuhnen induzieren wie Leitelemente Sekundärströmungen. Sie verlaufen an der Sohle in Richtung Bühnenwurzel. Die Sekundärströmungen treten bei allen untersuchten relativen Höhen ( $H = 1/4$  bis  $1/10$ ) auf. Die Sekundärströmungen bewirken die in Abschnitt 6.1.1.1 beschriebenen Änderungen der Geschwindigkeitsverteilung. Die Wirkungsweise inklinanter Lenkbuhnen ähnelt damit stark der von Leitelementen. Rechtwinklig angeordnete Lenkbuhnen induzieren dagegen keine Sekundärströmung, ihr Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung ist daher gegenüber inklinanten Lenkbuhnen gering.

### 6.1.1.3 Wellenbildung

Bei den Laboruntersuchungen zeigten sich bei den meisten Versuchsanordnungen ruhige Fließbilder ohne oder mit nur geringer Wellenbildung (Abb. 6.8b, Abb. 6.9). Tendenziell nahm die Wellenbildung mit dem Inklinationswinkel zu. Die größten Wellen traten bei  $\alpha = 90^\circ$ ,  $l_p = 30$  cm und  $a_x = 60$  cm auf (Abb. 6.8a), wobei selbst diese Wellen für die Praxis als unkritisch beurteilt werden. Bei allen Versuchsanordnungen trat die Wellenbildung vor allem über dem Bühnenkopf auf. In den Uferbereichen zeigten sich deutlich kleinere Wellen.

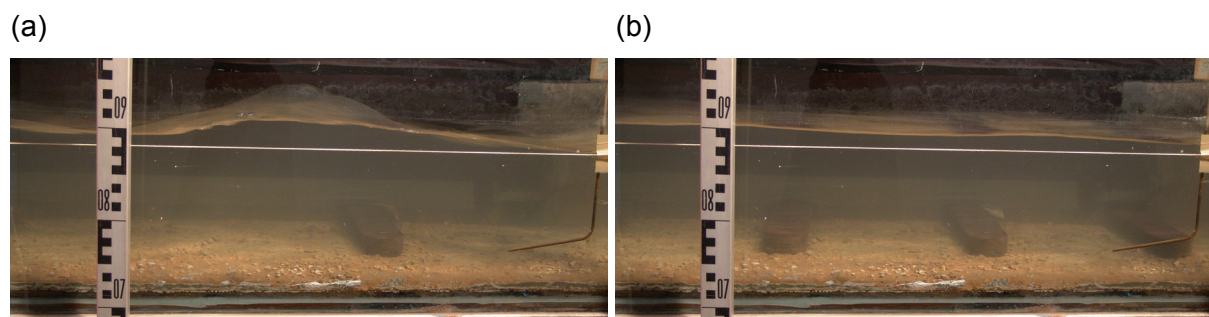


Abb. 6.8: Wellenbildung in Abhängigkeit vom Bühnenabstand  $a_x$  (Beispiel:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $H = 1/10$ ,  $a_x = 30$  cm (a) und 60 cm (b)); Bereich der Fotos:  $x \approx 2.0 \div 2.8$  m

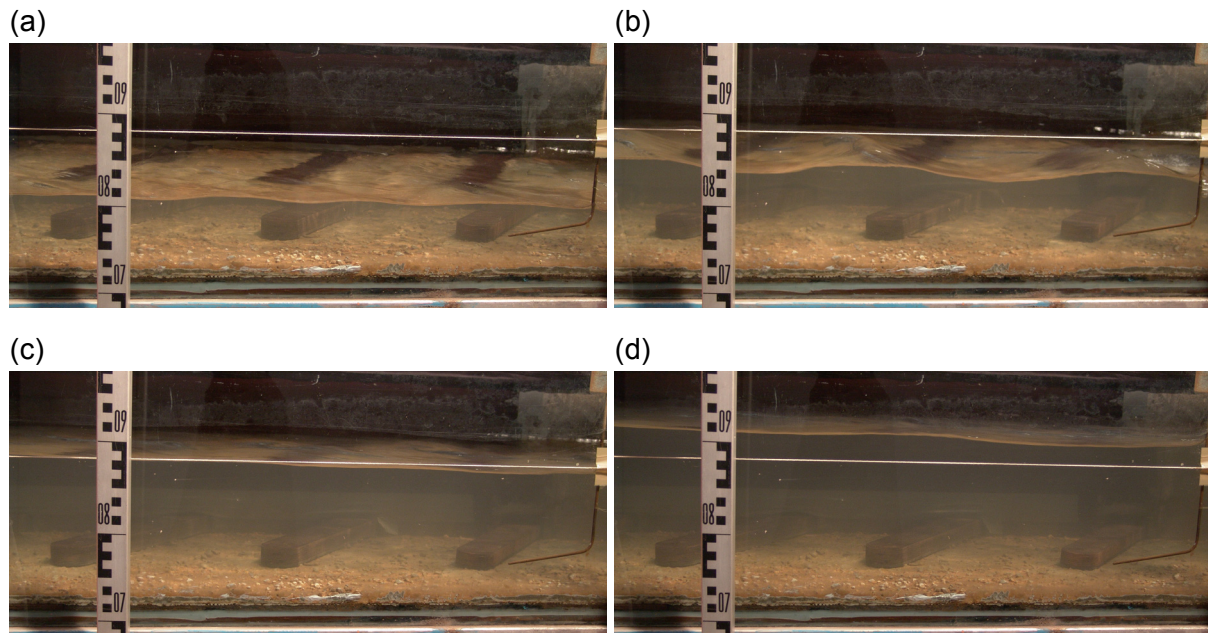


Abb. 6.9: Wellenbildung in Abhängigkeit von der relativen Höhe  $H$  (Beispiel:  $\alpha=60^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm;  $H = 1/4$  (a),  $1/6$  (b),  $1/8$  (c),  $1/10$  (d)); Bereich der Fotos:  $x \approx 2.0 \div 2.8$  m

### 6.1.2 Morphologie

Die Versuche mit eingestreuter Sandschicht (Abschnitt 5.2.3) verdeutlichen den Einfluss inklinanter Lenkbuhnen auf den Geschiebetransport und die Sohlenmorphologie. Durch die erhöhte Geschwindigkeit im Bereich des Buhnenkopfs wird das Geschiebe hier verstärkt mobilisiert. Das außerhalb der Lenkbuhnen eingebaute Sohlenmaterial wird im Wesentlichen in Fließrichtung weitertransportiert. Das Material aus den Buhnenfeldern wird durch die Sekundärströmung in Richtung der Buhnenwurzel transportiert. Es lagert sich, begünstigt durch die verringerte Fließgeschwindigkeit, entlang der buhnenseitigen Wand ab (Abb. 6.10a). Es wird angenommen, dass dieser Prozess in Fließgewässern eine uferschützende Wirkung hat, da die Ablagerungen ein Unterspülen des Ufers verhindern.

Die Änderungen der Sohlenmorphologie zeigten sich auch noch etwa 2 m unterstrom der Lenkbuhnen mit in Fließrichtung abnehmender Ausprägung (Abb. 6.10b). Die Wirkung der Lenkbuhnen geht folglich weit über ihren Einbaubereich hinaus.



(a)



(b)



Abb. 6.10: Sohlenmorphologie innerhalb (a) und unterstrom (b) der Lenkbuhnenstrecke im Laborgerinne; Blick gegen die Fließrichtung

### 6.1.3 Vergleich mit Naturbeobachtungen

Der Ellikerbach (Einzugsgebiet ca. 19 km<sup>2</sup>) verläuft im nördlichen Teil des Kantons Zürich und ist durch ein einheitliches Trapezprofil gekennzeichnet. Die Uferböschungen gehen über weite Strecken ohne Berme direkt in die angrenzenden Deiche über. Die Böschungen wurden bereits an mehreren Stellen erodiert und damit auch die Deiche gefährdet (Abb. 6.11 links). Zur Sicherung der Böschung unter gleichzeitiger Verbesserung der Gewässerstruktur wurden im Rahmen einer Pilotmaßnahme im Juli 2008 erstmalig in der Schweiz in fünf Abschnitten des Bachs Lenkbuhnen eingebaut (Mende & Sindelar 2010).

Bei der Pilotmaßnahme zeigte sich die gleiche morphologische Wirkung der Lenkbuhnen wie im Laborgerinne (Abschnitt 6.1.2), aufgrund der beweglichen Sohle war die Wirkung jedoch ausgeprägter als bei der relativ dünnen eingestreuten Sandschicht über der festen Sohle im Labor. Die vorher annähernd horizontale Sohle ist heute durch Kolke unterstrom der Buhnenköpfe gekennzeichnet und an den zu schützenden Böschungen hat sich Geschiebe abgelagert. Teilweise kommt auf diesen Ablagerungen bereits Bewuchs (insbesondere Rohrglanzgras) auf, durch den die Böschung weiter stabilisiert wird (Mende & Sindelar 2010). Seit dem Einbau der Lenkbuhnen ist keine Ufererosion mehr feststellbar, eine „Bewährungsprobe“ bei einem großen Hochwasser steht jedoch noch aus.



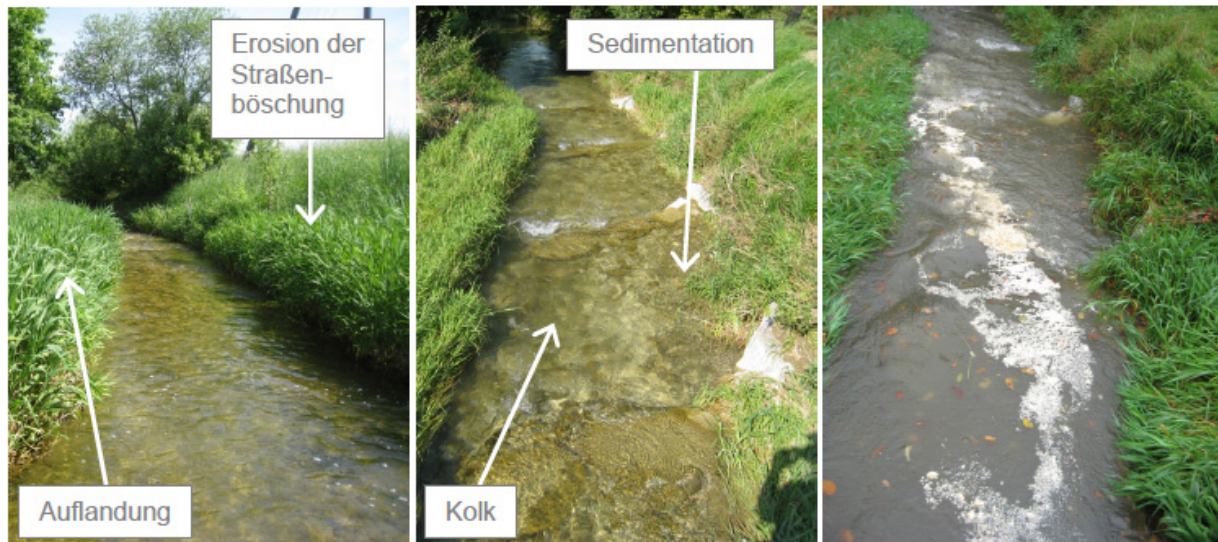


Abb. 6.11: Situation vor (links) und zwei Monate nach dem Einbau von Lenkbuhnen aus Blocksteinen (Mitte); visualisierte Oberflächenströmung bei erhöhtem Abfluss im Oktober 2008 (rechts). Blick in Fließrichtung (Mende & Sindelar 2010)

Das durch die Lenkbuhnen bei starker Überströmung an der Wasseroberfläche bewirkte Strömungsbild konnte während eines kleineren Hochwasserereignisses im Oktober 2008 durch Zugabe von Holzeinstreu visualisiert werden (Abb. 6.11 rechts). Wie in den Laborversuchen (Abb. 6.6 oben und Mitte) werden die Schwimmstoffe von der Buhnenwurzel in Richtung des Buhnenkopfs gelenkt (Abb. 6.11 rechts). Daraus kann geschlossen werden, dass auch in der Natur die im Labor nachgewiesene Sekundärströmung auftritt.



Abb. 6.12: Pralluferschutz mit inklinanten Lenkbuhnen am Aschbach bei Gußwerk / Steiermark; links: Gesamtansicht (Blick gegen die Fließrichtung); rechts: Detailaufnahme mit Geschiebeablagerungen am buhnenseitigen Ufer und Eintiefungen entlang der Buhnenköpfe





Abb. 6.13: Lenkbuhnen zum Schutz eines Prallufers an der Taverna / Kanton Freiburg; links: Hochwasser (ca.  $HQ_2 = 22 \text{ m}^3/\text{s}$  (Werdenberg et al. 2012a)); rechts: Niedrigwasser mit eingezeichneten Kolkiefen unterhalb der Lenkbuhnenköpfe (Foto: Werdenberg 2012)

Eine ähnliche morphologische Wirkung wie am Ellikerbach konnte auch bei zahlreichen Lenkbuhnen in der Steiermark (Abb. 6.12), an der Taverna (Abb. 6.13 rechts) und beim Monitoring der Pilotmaßnahme an der Wiese (Abschnitt 5.1.1) beobachtet werden. An der Wiese war die bislang einzige Messkampagne nach dem Einbau der Lenkbuhnen jedoch noch von den Auswirkungen der erst kurz zuvor abgeschlossenen Bautätigkeiten beeinflusst. Die Ergebnisse konnten daher nicht mit Sicherheit gänzlich auf den Einbau zurückgeführt werden (Mende & Koll 2008), weshalb auf diese Maßnahme nicht weiter eingegangen wird.

Neben dem Strömungsbild und der morphologischen Wirkung weist auch die Wellenbildung in der Natur große Ähnlichkeit mit den Beobachtungen bei den Laborversuchen auf (Abb. 6.13 links). Ebenso wie im Labor ist die Wellenbildung selbst bei einem großen Gefälle wie an der Taverna ( $I_0 > 1.5\%$ ) gering und auf den Bereich über dem Bühnenkopf beschränkt, wogegen die Strömung entlang der Ufer eher ruhig ist.

Der Vergleich mit den Naturbeobachtungen verdeutlicht, dass die im Labor nachgewiesene Strömungsbeeinflussung und morphologische Wirkung inklinanter Lenkbuhnen ebenso wie die geringe Wellenbildung auch in der Natur auftreten. Dies unterstreicht die gute Eignung der durchgeführten Laboruntersuchungen, um insbesondere die Strömungsvorgänge an Lenkbuhnen detailliert zu untersuchen und auf die Natur übertragbare Erkenntnisse zum Einfluss der Lenkbuhnenanordnung und -geometrie auf das Strömungsbild abzuleiten.

## 6.2 Einfluss dimensionsloser Parameter

### 6.2.1 Quergeschwindigkeit

Wang & Odgaard (1993) wählten zur analytischen Beschreibung der durch Leitelemente hervorgerufenen Quergeschwindigkeiten einen linearen Ansatz, mit dem die Quergeschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe und darauf aufbauend auch der Drehimpuls (Abb. 2.2) berechnet werden kann. In den linearen Ansatz fließt die relative Quergeschwindigkeit  $c$  ein (Gl. 4.13, S. 53). Die relative Quergeschwindigkeit definieren Wang & Odgaard (1993) als

das Verhältnis der Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche  $v_s$  zur tiefengemittelten Geschwindigkeit in Fließrichtung vor Einbau der Leitelemente  $\bar{u}$  (Gl. 4.15, S. 53). Da sich  $\bar{u}$  jedoch innerhalb der Leitelementstrecke ändert, kann die Quergeschwindigkeit mit diesem Vorgehen nur näherungsweise berechnet werden.

Zur Berechnung von  $c$  kann daher anstelle von  $\bar{u}$  ebenso gut die in der Praxis weit einfacher zu berechnende mittlere Fließgeschwindigkeit  $u_m$  vor Einbau der Leitelemente bzw. Lenkbuhnen verwendet werden. Es gilt:

$$c \approx \frac{v_s}{u_m} \quad \text{Gl. 6.1}$$

wobei

$$u_m = \frac{Q}{A_{\perp}} \quad \text{Gl. 6.2}$$

mit:

$Q$  = Abfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$A_{\perp}$  = Fließquerschnitt [ $\text{m}^2$ ]

Das Ziel des weiteren Vorgehens ist es, die Abhängigkeiten zwischen der durch Lenkbuhnen bewirkten relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dimensionslosen Lenkbuhnenparametern analytisch zu beschreiben.

In einem ersten Schritt wurde für jede Messvertikale der Drehimpuls nach Abb. 2.2 (S. 6) bestimmt. Unter Berücksichtigung aller berechneten Drehimpulse wurde dann eine Näherungsfunktion bestimmt, mit der der Verlauf der Drehimpulse über die Rinnenbreite für die jeweilige Versuchsanordnung berechnet werden kann. Die Berücksichtigung aller Drehimpulse ist sinnvoll, da die Sekundärströmung über den gesamten Messbereich ( $x = 90 \div 300 \text{ cm}$ ) annähernd voll entwickelt war (Kapitel 6.1.1.2). Der Vergleich verschiedener Funktionen zeigt, dass der Verlauf der Drehimpulse über die Rinnenbreite am besten über ein Polynom dritten Grades angenähert werden kann. Der mit der Näherungsfunktion berechnete Drehimpuls wird im Folgenden als „mittlerer Drehimpuls“  $L_m$  bezeichnet. Er wurde bei allen Versuchsanordnungen für  $y = 3$  und  $8 \text{ cm}$  berechnet, für Versuche mit  $l_p = 30 \text{ cm}$  auch für  $y = 20 \text{ cm}$ . Außerhalb des Lenkbuhnenbereichs traten keine Sekundärströmungen auf (Abschnitt 6.1.1.2 und Abb. 6.14 bei  $y = 32 \text{ cm}$ ), die Berechnungen beschränkten sich daher auf diesen Bereich.

In einem zweiten Schritt wurde für jede Versuchsanordnung jeweils für  $y = 3, 8$  und teilweise  $20 \text{ cm}$  eine lineare Quergeschwindigkeitsverteilung berechnet, deren Drehimpuls dem mittleren Drehimpuls  $L_m$  entspricht (Abb. 6.15, gestrichelte schwarze Linie). Zur Berechnung von  $c$  wurde dann die mit der Näherungsfunktion berechnete Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche  $v_s$  (Beispiel Abb. 6.15:  $v_s = 15.3 \text{ cm/s}$ ) durch die mittlere Geschwindigkeit  $u_m$  dividiert.

Alternativ zu dem beschriebenen Vorgehen unter Berücksichtigung des mittleren Drehimpulses hätte die lineare Funktion zur Beschreibung der Quergeschwindigkeit und die aus ihr abgeleitete relative Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche  $c$  nur „per Augenmaß“ bestimmt werden können. Dieses Vorgehen wäre jedoch mit großen Ungenauigkeiten verbunden gewesen.

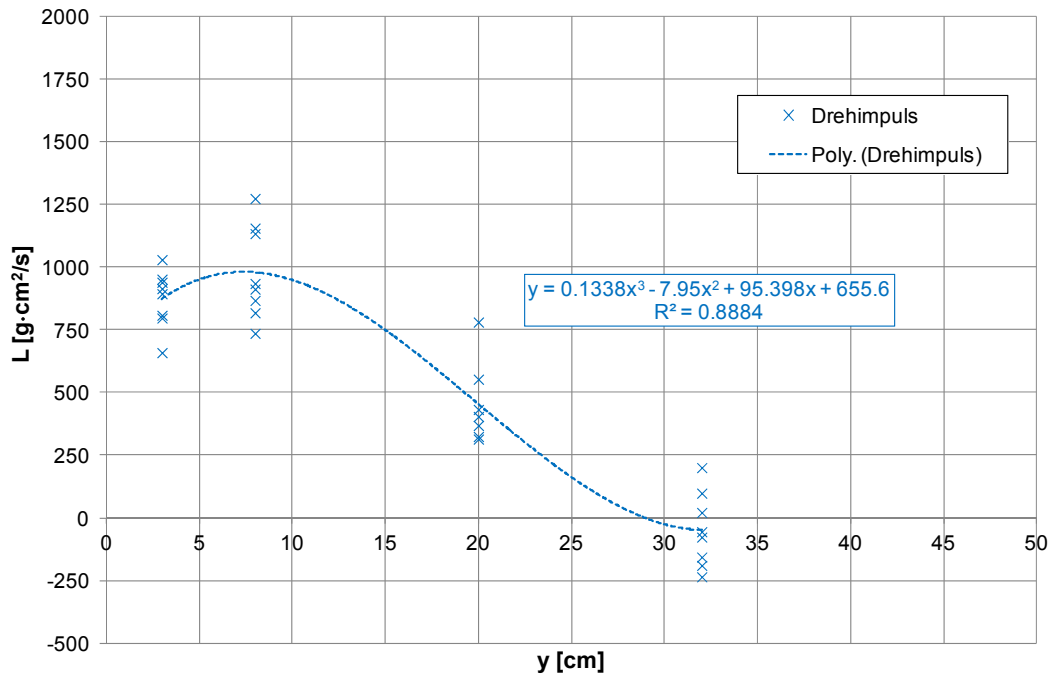


Abb. 6.14: Näherungsfunktion zur Beschreibung der Drehimpulsverteilung  $L$  über die Gerinnebreite (Beispiel:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm,  $H = 1/10$ )

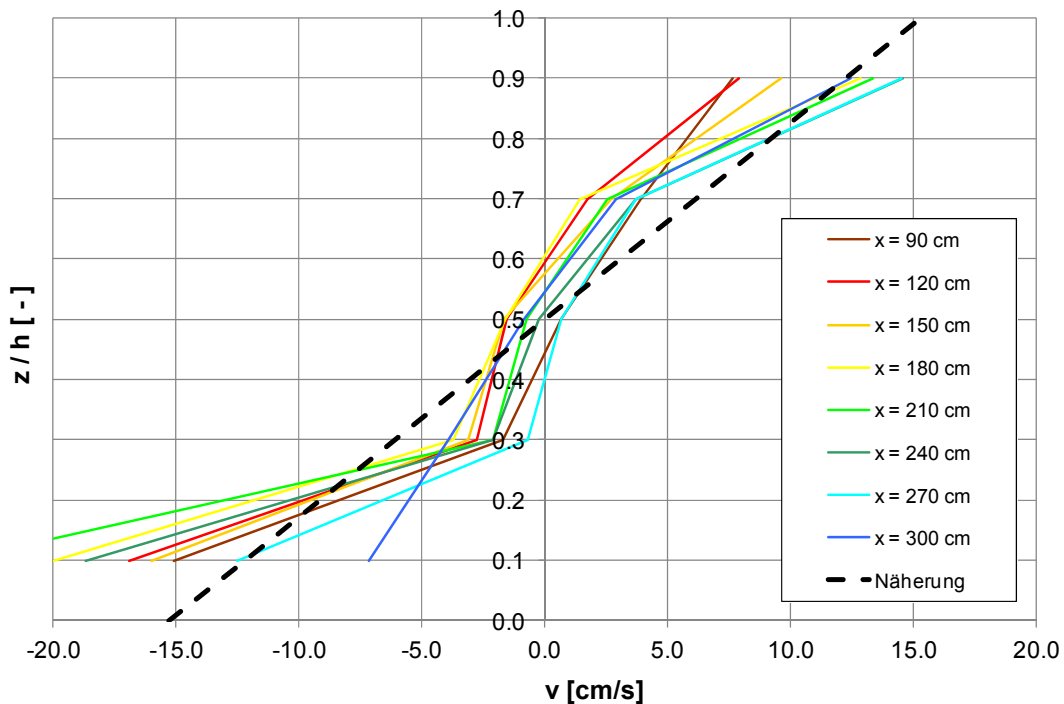


Abb. 6.15: Gemessene Quergeschwindigkeiten  $v$  in einer Messvertikale mit linearer Näherungsfunktion (Beispiel:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm,  $H = 1/10$ ;  $y = 8$  cm)

Nachdem die relativen Quergeschwindigkeiten  $c$  für alle Versuchsanordnungen bestimmt waren, wurden die Abhängigkeiten zwischen  $c$  und dimensionslosen Lenkbahnenparametern untersucht. Dabei konnte ein logarithmischer Zusammenhang zwischen dem relativen Abstand  $A_B$  (Kapitel 3.2.2, Gl. 3.1) und der relativen Quergeschwindigkeit nachgewiesen werden (Abb. 6.16, Abb. 6.17 und Anhang 5).

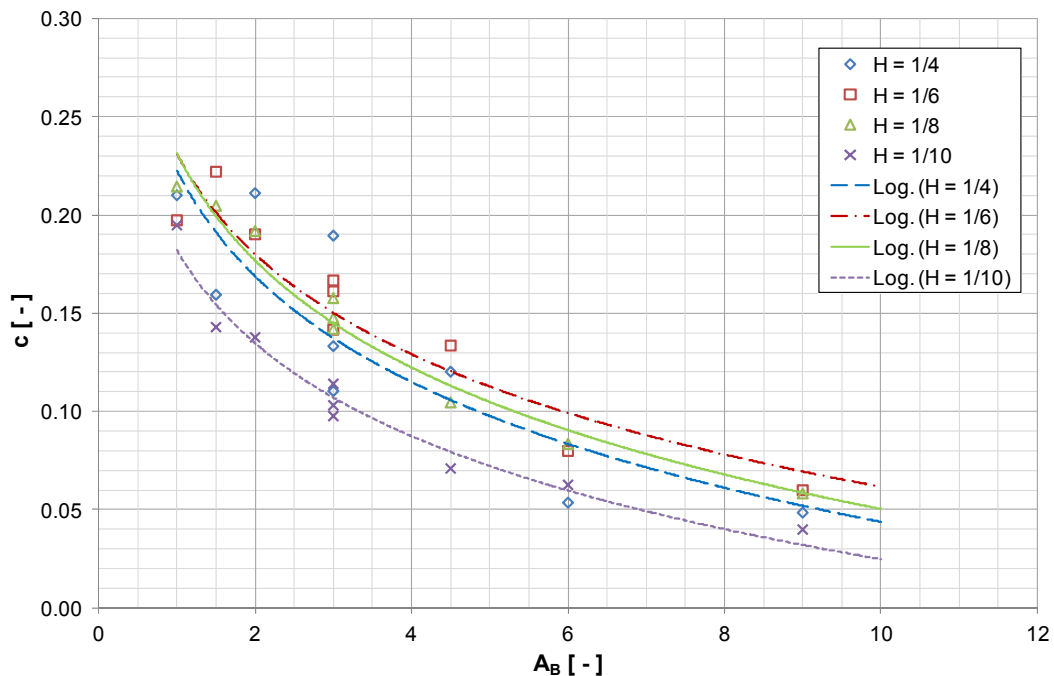


Abb. 6.16: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$  für  $\alpha = 30^\circ$  und  $y = 8$  cm

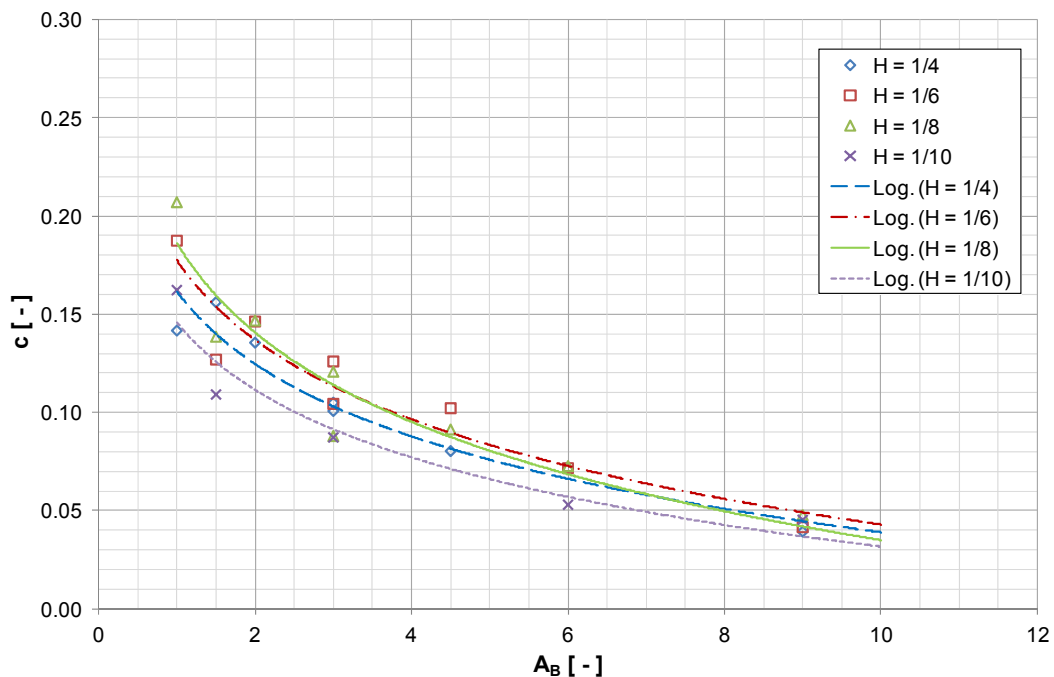


Abb. 6.17: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$  für  $\alpha = 60^\circ$  und  $y = 8$  cm

Außerdem zeigte sich, dass die relative Quergeschwindigkeit in dem untersuchten Bereich nur wenig mit der relativen Lenkbuhnenhöhe  $H$  variiert. Die maximale relative Quergeschwindigkeit  $c$  wird bei gleichem  $A_B$  im Bereich von  $H = 1/8$  bis  $1/6$  induziert. Sowohl oberhalb als auch unterhalb dieses Bereichs nimmt  $c$  wieder leicht ab, wobei der Wert auch bei  $H = 1/10$  noch etwa 80% des Maximums beträgt.

Tendenziell induzieren Lenkbuhnen bei einem Inklinationswinkel von  $30^\circ$  höhere Quergeschwindigkeiten als bei  $60^\circ$ , was bei  $y = 8$  cm am stärksten ausgeprägt ist (Abb. 6.16, Abb. 6.17, Anhang 5). Da die Quergeschwindigkeiten linear in die Berechnung des Drehimpulses einfließen (Abb. 2.2), wird bei  $\alpha = 30^\circ$  auch der größere Drehimpuls hervorgerufen. Lenkbuhnen zeigen damit ein ähnliches Verhalten wie die von Marelus & Sinha (1998) untersuchten Leitelemente (Abb. 4.4). Ob Lenkbuhnen jedoch auch bei einem Inklinationswinkel von  $40^\circ$  den größten Drehimpuls induzieren, konnte anhand der durchgeführten Versuche nicht abschließend beurteilt werden.

Diese Ergebnisse verdeutlichen nochmals, dass die von Wang & Odgaard (1993) entwickelte Gleichung zur Berechnung der relativen Quergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Leitelementanordnung und -geometrie (Kapitel 4.4.1, Gl. 4.13) für Lenkbuhnen ungeeignet ist und auch bei Leitelementen bestenfalls innerhalb enger Anwendungsgrenzen gilt. Sie führt zu einer starken Überschätzung der Quergeschwindigkeit bei großen Inklinationswinkeln, der Einfluss geringer relativer Höhen wird dagegen zumindest bei Lenkbuhnen unterschätzt. Darüber hinaus wird auch die Zunahme der relativen Quergeschwindigkeit vom Buhnenkopf zur -wurzel (vgl. Abb. 6.14) in der Formel nicht berücksichtigt. Stattdessen wird von einer einheitlichen Quergeschwindigkeit im Einbaubereich der Leitelemente bzw. Lenkbuhnen ausgegangen.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis ist, dass  $c$  nahe der Buhnenwurzel ( $y = 3$  und  $8$  cm) bei  $A_B = 1.6$  bis  $2.0$ , wie in Werdenberg et al. (2012a, b) für enge Kurven ( $r < 3b_{so}$ ) empfohlen (Kapitel 3.2.2), sowohl für  $\alpha = 30^\circ$  als auch  $60^\circ$  bei allen untersuchten relativen Höhen Werte größer als  $0.1$  erreicht. Die maximalen Werte bei  $A_B = 1.6$  erreichen fast  $0.2$  (Abb. 6.16). Kurveninduzierte relative Quergeschwindigkeiten liegen bei voralpinen Flüssen im Bereich von  $c = 0.01$  bis  $0.1$  (Kapitel 2.3.3) und sind mitunter weit kleiner als die durch Lenkbuhnen induzierten. Die Sekundärströmungen in Kurven voralpiner Flüsse können folglich durch den Einbau inklinanter Lenkbuhnen nahe der Buhnenwurzel nicht nur vollständig neutralisiert werden, sondern es kann sogar ihre Drehrichtung umgekehrt werden, was mit Auflandungen entlang des Prallufers verbunden ist. Die in Flusskurven auftretende Verlagerung des Stromstrichs an das Prallufer und die damit verbundene Ausbildung eines ufernahen Kurvenkolks werden somit verhindert. Stattdessen wird durch die lenkbuhneninduzierte Sekundärströmung Geschiebe zum Prallufer transportiert, wo es sich aufgrund der reduzierten Fließgeschwindigkeit uferschützend ablagert (vgl. Abb. 6.10 und Abb. 6.11). Hydraulisch-morphologisch gesehen entsteht durch den Einbau der Lenkbuhnen am Prallufer also quasi ein Gleitufer.

Da die lenkbuhneninduzierte Quergeschwindigkeit zum Buhnenkopf bis auf null abnimmt, muss es zwischen Wurzel und Kopf einen Übergang geben, ab dem wieder die kurveninduzierte Sekundärströmung überwiegt. Lenkbuhnen kehren die Drehrichtung der kurvenindu-

zierten Sekundärströmung folglich nicht über ihre gesamte Länge um, im Bereich des Bühnenkopfes überwiegt wieder der Einfluss der Kurvenströmung.

Mit den entwickelten Diagrammen (Abb. 6.16, Abb. 6.17, Anhang 5) steht eine einfache und praxistaugliche Möglichkeit zur Verfügung, die durch Lenkbühnen mit Inklinationswinkeln von  $30^\circ$  und  $60^\circ$  induzierten Quergeschwindigkeiten ausreichend genau abzuschätzen. Die Diagramme verdeutlichen, dass die Ergebnisse einer gewissen Streubreite unterliegen, wie sie bei naturnahen Bauweisen aus formwilden und nur schwer genau einzubauenden, tonnen-schweren Blocksteinen ohnehin zu erwarten sind.

### 6.2.2 Geschwindigkeitsverteilung

Die Geschwindigkeitsverteilung ändert sich im Bereich der seriell angeordneten Lenkbühnen mit dem Fließweg (Abb. 6.2 und Abb. 6.3). Erst im unteren Bereich der Lenkbühnenstrecke ( $x = 180 \div 240$  cm) werden annähernd konstante Geschwindigkeitsverteilungen erreicht. Am Ende der Lenkbühnenstrecke ( $x = 270 \div 300$  cm) führt dann die Beschleunigung wieder zu verstärkten Änderungen der Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Bühnenköpfe (Kapitel 6.1.1.1).

Abb. 6.18 zeigt den Verlauf von  $\bar{u}$  ( $y = 3$  cm) in Fließrichtung für die Nullvariante ohne Lenkbühnen (gestrichelte Linie) und für eine Versuchsanordnung mit engem Bühnenabstand ( $a_x = l_B = 30$  cm,  $H = 1/10$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ). Der Messbereich beginnt bei der Versuchsanordnung mit Lenkbühnen 30 cm oberhalb der bei  $x = 0$  cm angeordneten ersten Lenkbühne und endet unmittelbar nach der letzten Buhne bei  $x = 300$  cm (s.a. Abb. 5.7). Bei der Nullvariante wurde nur im Bereich von  $x = 90$  bis 300 cm gemessen, in dem die tiefengemittelten Geschwindigkeiten über den Fließweg quasi konstant waren (Abb. 6.18). Da diese Geschwindigkeiten auch außerhalb des Messbereichs angenommen werden konnten, war durch eine Vergrößerung des Messbereichs kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten.

Bei der Versuchsanordnung mit Lenkbühnen nimmt die ufernahe Geschwindigkeit  $\bar{u}$  ( $y = 3$  cm) ab der ersten Lenkbühne schnell ab (Abb. 6.18, durchgezogene Linie). Sie erreicht bereits zwischen der 3. und 4. Buhne ( $x = 60 \div 90$  cm) ihr Minimum. Die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit wird in diesem Bereich gegenüber der Situation ohne Bühnen um etwa 40% reduziert. Danach steigt die ufernahe Fließgeschwindigkeit wieder leicht an, bis sie ab der 7. Lenkbühne ( $x = 180$  cm) einen weitgehend konstanten Wert erreicht. Die Fließgeschwindigkeit ist hier bei der gewählten Versuchsanordnung um etwa 30% niedriger als ohne Bühnen.



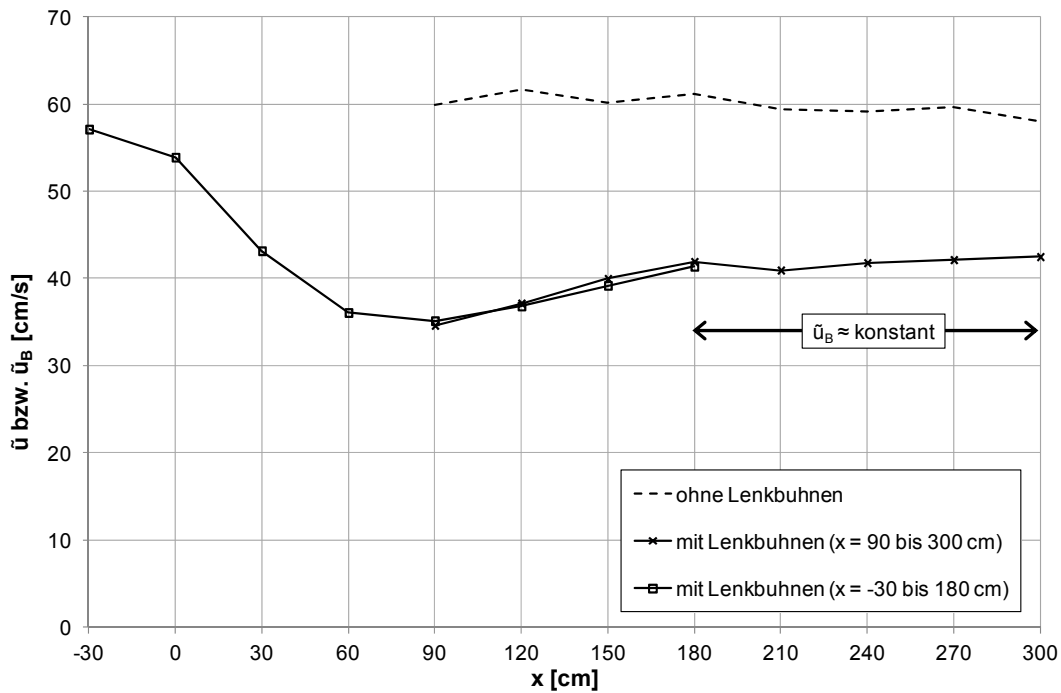


Abb. 6.18: Vergleich der Entwicklung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit in Fließrichtung mit Lenkbuhnen  $\bar{u}_B$  und ohne Lenkbuhnen  $\bar{u}$  (Beispiel:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm,  $H = 1/10$ ;  $y = 3$  cm)

Analog zu Wang & Odgaard (1993) wurde die Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit mit Lenkbuhnen  $\bar{u}_B$  über die Gerinnebreite untersucht. Hierbei wurden nur die Messungen in dem annähernd stationären Bereich von  $x = 180 \div 240$  cm berücksichtigt. Es wurden für jede Versuchsanordnung Mittelwerte von  $\bar{u}_B(y)$  über  $x = 180 \div 240$  cm gebildet und mit den Werten ohne Lenkbuhnen  $\bar{u}(y)$  verglichen.

Des Weiteren wurde der Einfluss dimensionsloser Parameter auf die Veränderung der Geschwindigkeitsverteilung über die Breite untersucht. Es zeigte sich, dass der relative Abstand  $A_B$ , wie auch bei der Induzierung einer Quergeschwindigkeit (Abschnitt 6.2.1), die maßgebliche dimensionslose Größe darstellt.

Abb. 6.19 bis Abb. 6.22 zeigen die Verringerung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit für  $y = 3, 8, 20$  und  $32$  cm bei  $\alpha = 60^\circ$  in Bezug zum relativen Abstand  $A_B$ . Die entsprechenden Diagramme für  $\alpha = 30^\circ$  und  $90^\circ$  sind Anhang 6 zu entnehmen. Für  $y = 40$  cm konnten keine Diagramme mit  $\bar{u}$  entwickelt werden, da hier nur Messungen mit der nach unten messenden 3D-Sonde möglich waren (Abschnitt 5.1.3.1) und die Berechnung einer tiefengemittelten Geschwindigkeit daher nicht möglich war. Stattdessen wurde die Verringerung der lokalen Geschwindigkeit  $u$  für  $z = 2$  cm und soweit gemessen auch für  $z = 6$  und  $10$  cm anhand von Mittelwerten über  $x = 180 \div 240$  cm bestimmt (Abb. 6.23).

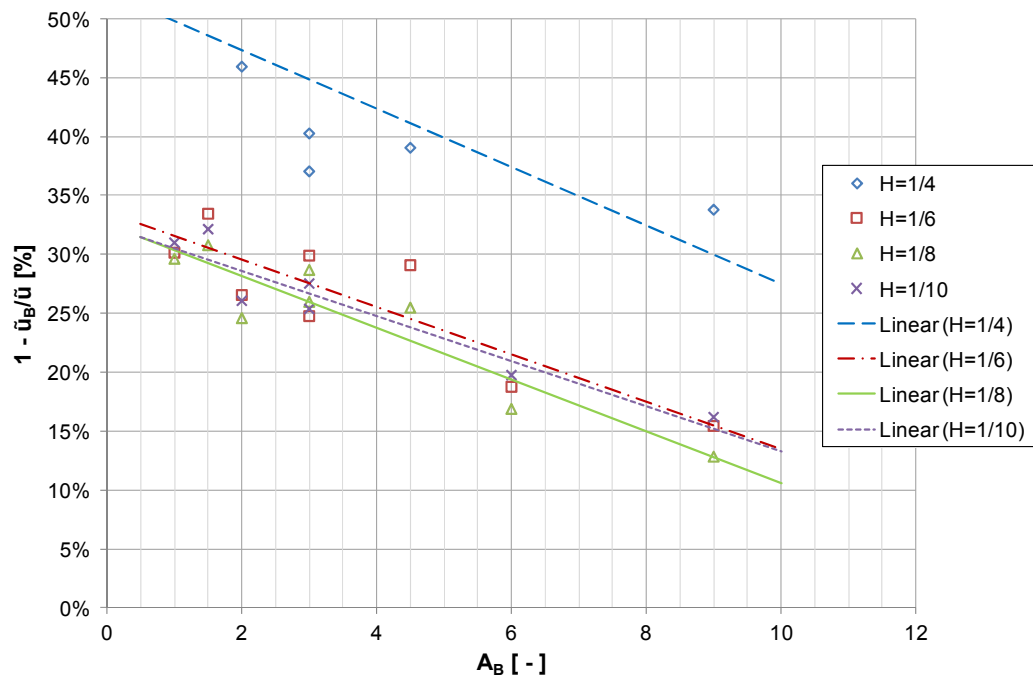


Abb. 6.19: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 3$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 60^\circ$

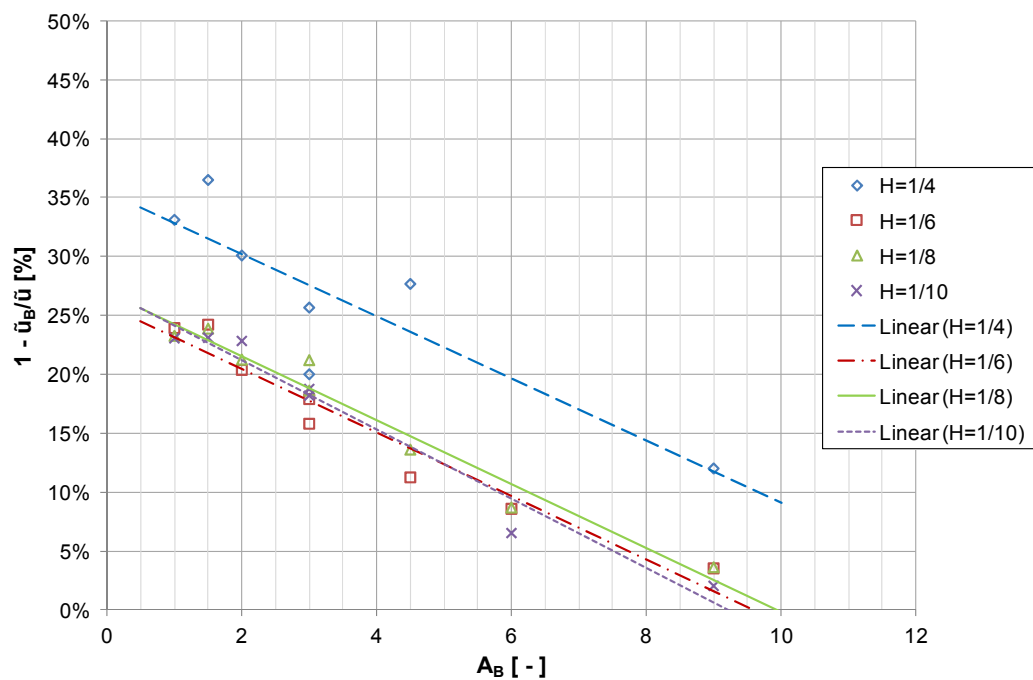


Abb. 6.20: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 8$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 60^\circ$

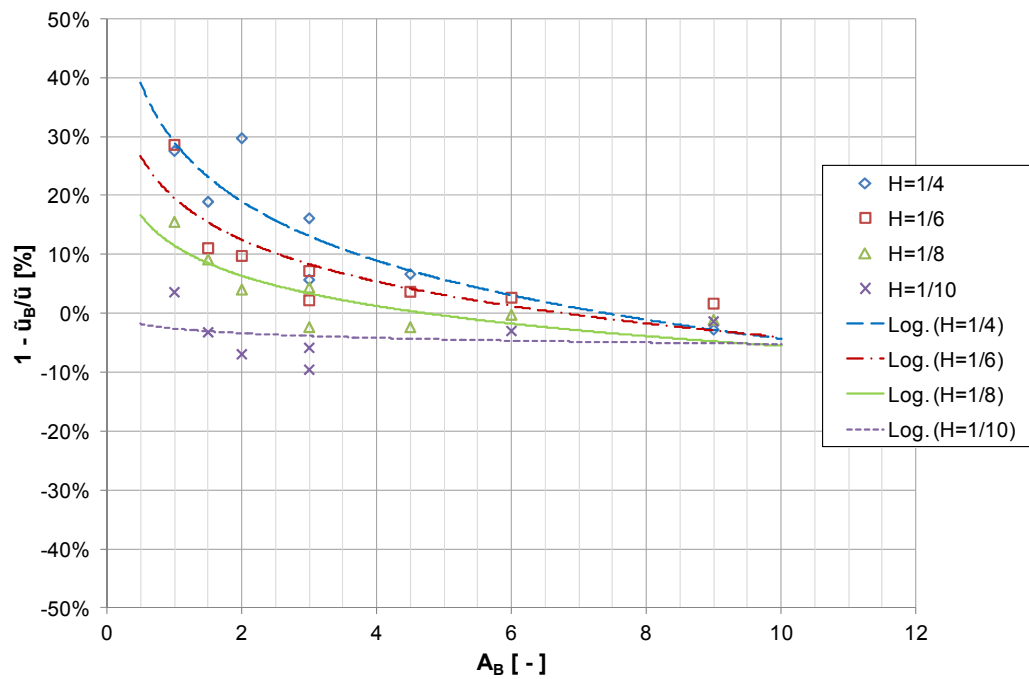


Abb. 6.21: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 20$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 60^\circ$

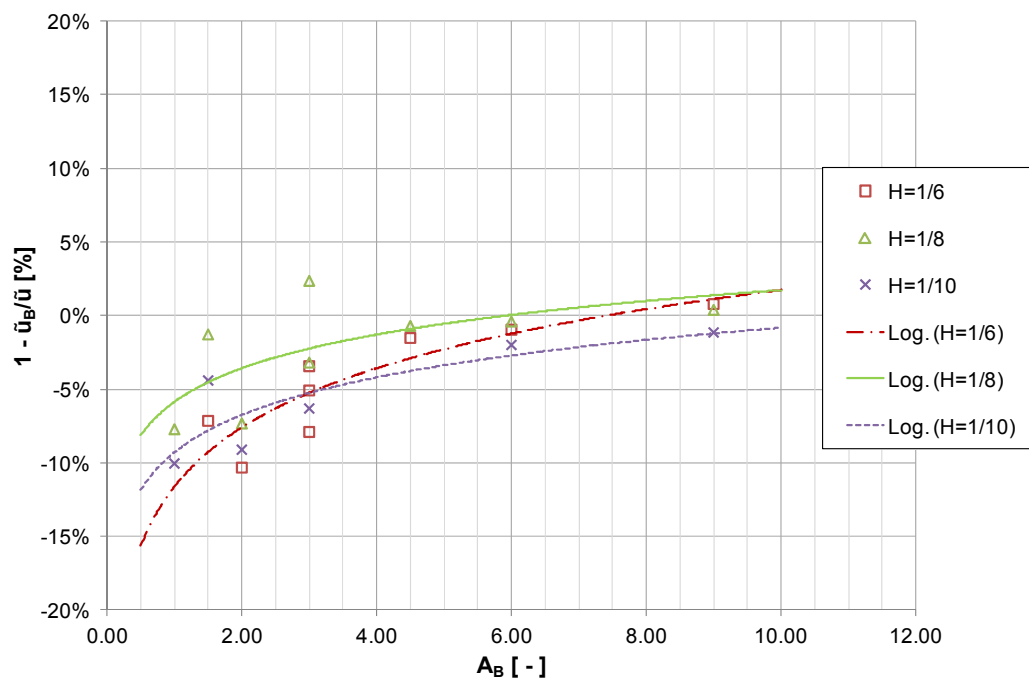


Abb. 6.22: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 32$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 60^\circ$

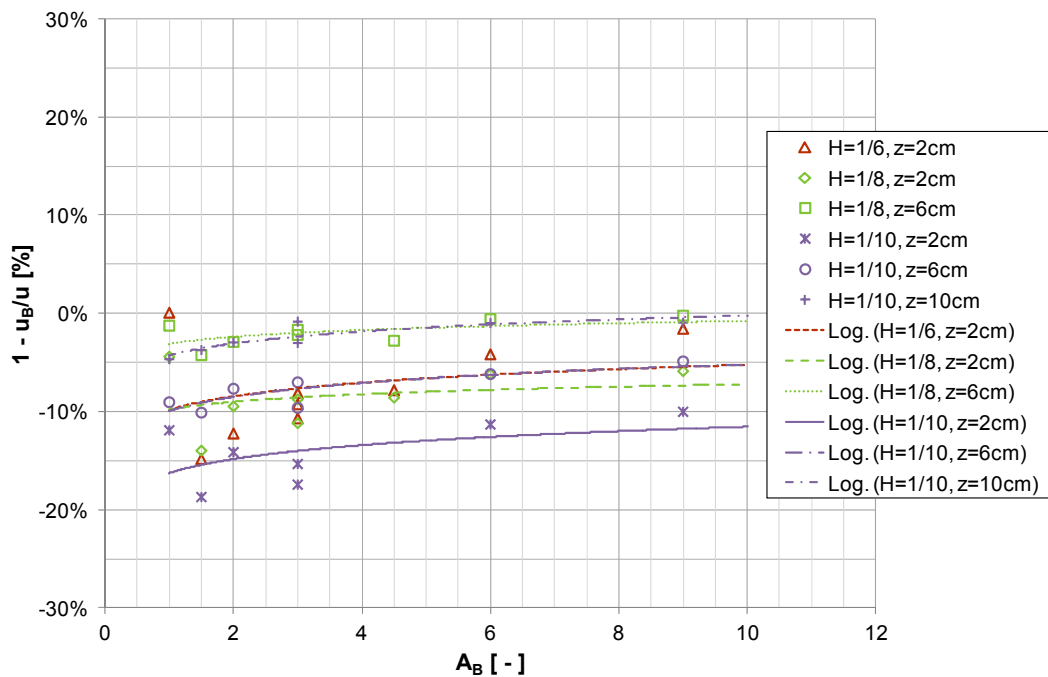


Abb. 6.23: Änderung der lokalen Fließgeschwindigkeit  $u$  bei  $y = 40$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 60^\circ$

In Ufernähe ( $y = 3$  und  $8$  cm) besteht bei inklinanten Lenkbuhnen ( $\alpha = 30^\circ$  und  $60^\circ$ ) ein linearer Zusammenhang zwischen der Verringerung der Fließgeschwindigkeit und dem relativen Abstand  $A_B$  (Abb. 6.19, Abb. 6.20, Anhang 6). Dabei besteht von  $H = 1/6$  bis  $1/10$  kein Einfluss der relativen Höhe. Eine Ausnahme bildet  $y = 3$  cm bei  $\alpha = 30^\circ$  (Abb. A11, S. 133). Je kleiner  $H$ , umso größer ist hier die Verringerung von  $\bar{u}$ . Im Gegensatz zu den inklinanten Lenkbuhnen zeigte sich bei  $\alpha = 90^\circ$  eine große Streubreite der Ergebnisse, der Zusammenhang zwischen der Verringerung der Geschwindigkeit und  $A_B$  war weit weniger ausgeprägt (Abb. A14 bis Abb. A16).

Bei ansonsten gleicher Buhnenanordnung wurde bei  $\alpha = 90^\circ$  tendenziell die kleinste Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit erzielt, was auf die fehlende Induzierung einer Sekundärströmung zurückgeführt wird. Bei  $\alpha = 60^\circ$  wurde eine größere Verringerung als bei  $30^\circ$  verzeichnet. Für  $H = 1/6 \div 1/10$  wurde bei  $\alpha = 60^\circ$  und  $A_B = 1$  für  $y = 3$  cm eine Verringerung um ca. 30% erreicht, bei  $\alpha = 30^\circ$  lag sie maximal bei etwa 25% (Abb. 6.19 und Abb. A11). Dieses Ergebnis überrascht, da bei  $\alpha = 30^\circ$  eine stärkere Sekundärströmung als bei  $60^\circ$  induziert wird (Abschnitt 6.2.1).

Es besteht folglich kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Stärke der induzierten Sekundärströmung und der Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit. Mögliche Ursachen hierfür sind

- Die größere Rauheitswirkung von  $60^\circ$ -Buhnen (vgl. Abschnitt 6.2.3)
- Die zunehmende Durchmischung bei stärker werdender Sekundärströmung. Sie führt dazu, dass nicht mehr nur sohlennahes, also langsam fließendes Wasser, sondern auch schneller fließendes Wasser aus geringerer Wassertiefe zum Ufer gelenkt wird.

Interessanterweise wurde mit  $H = 1/4$  bei  $\alpha = 60^\circ$  die größte Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit erzielt, bei  $\alpha = 30^\circ$  dagegen die kleinste. Woraus dieser Unterschied resultiert, konnte nicht abschließend geklärt werden. Es wird vermutet, dass bei den relativ hohen Lenkbuhnen bereits ein Übergang zur Wehrhydraulik (Kapitel 3.7.2) stattfand, wodurch die Geschwindigkeiten hinter den Buhnen relativ stark variierten. Somit haben bereits kleine, durch die unterschiedlichen Inklinationswinkel bedingte Abstandsunterschiede der Messpunkte zur Buhne nennenswerte Auswirkungen auf die gemessenen Geschwindigkeiten.

In größerer Distanz zur Lenkbuhnenwurzel ( $y = 20$  und  $32$  cm) besteht ein näherungsweise logarithmischer Zusammenhang zwischen der Verringerung von  $\bar{u}$  und  $A_B$  (Abb. 6.21). Der Einfluss der Lenkbuhnen auf die Geschwindigkeitsverteilung nimmt ab. Die Abnahme ist umso stärker ausgeprägt, je niedriger die Lenkbuhnen sind. Bei  $H = 1/10$  und  $y = 20$  cm entspricht  $\bar{u}$  bereits wieder weitgehend der Situation ohne Buhnen, tendenziell ist sogar eine leichte Zunahme, also eine negative Verringerung der Geschwindigkeit festzustellen.

Bei den Messungen bei  $y = 32$  cm, die bei allen Versuchsanordnungen außerhalb des Buhnenbereichs lagen, nimmt  $\bar{u}$  gegenüber der Nullvariante zu. Die Zunahme ist bei kleinen relativen Abständen (bis  $A_B = 3$ ) am stärksten ausgeprägt und liegt bei maximal 10%. Mit zunehmendem  $A_B$  geht der Einfluss auf  $\bar{u}$  ( $y = 32$  cm) gegen Null zurück.

Die Veränderungen der lokalen Geschwindigkeit  $u$  gegenüber der Nullvariante sind bei  $y = 40$  cm (Abb. 6.23) ähnlich gering wie die von  $\bar{u}$  bei  $y = 32$  cm. Bei  $A_B = 1$  liegt die Zunahme je nach relativer Höhe  $H$  zwischen 5 und 10%. Eine Ausnahme bildet die sohlennahe Geschwindigkeit  $u$  ( $z = 2$  cm) bei  $H = 1/10$  (Abb. 6.23, durchgezogene Linie). Sie ist bei  $A_B = 1$  um ca. 16% höher als ohne Buhnen. Warum diese Ausnahme bei  $H = 1/10$  auftritt, kann nicht abschließend begründet werden. Davon abgesehen lässt sich aus den Messungen bei  $y = 32$  und  $40$  cm ableiten, dass die Geschwindigkeit außerhalb des Lenkbuhnenbereichs nur geringfügig zunimmt und daher keine nennenswerte Erhöhung der Geschwindigkeit am den Lenkbuhnen gegenüberliegenden Ufer zu erwarten ist. Dies gilt insbesondere dann, wenn die in der Praxis üblichen relativen Abstände gewählt werden (Kapitel 3.2.2).

Lenkbuhnen reduzieren die Fließgeschwindigkeit im ufernahen Bereich von  $H = 1/10$  bis  $1/6$  unabhängig von ihrer relativen Höhe um bis zu 30%. Die ufernahe Fließgeschwindigkeit geht sowohl in die Widerstandskraft als auch in die Liftkraft, die auf ein Bodenteilchen des Ufers wirken, zum Quadrat ein (Gl. 4.6 bzw. Gl. 4.5, S. 45). Die auf das Ufer wirkende Kraft kann durch den Einsatz von Lenkbuhnen somit halbiert und das Ufer stark entlastet werden.

Die Fließgeschwindigkeit wird bei kleinem  $H$  nur in Ufernähe stark reduziert und nimmt zum Buhnenkopf über das Ausgangsniveau ohne Buhnen hinaus zu. Dies ist für die Gerinnestabilität von großem Vorteil. Würde die Fließgeschwindigkeit über einen größeren Bereich reduziert, müsste sie aus Kontinuitätsgründen am gegenüberliegenden Ufer entsprechend stark zunehmen, was mit einer verstärkten Uferbelastung verbunden wäre.

Die Belastung am gegenüberliegenden Ufer nimmt aus dem genannten Grund weit weniger zu, als sie entlang der Buhnenwurzeln abnimmt. Auch bei kleinem relativen Abstand  $A_B$  bzw. großer relativer Länge  $L_B = l_p / b$  ( $L = 0.6$ ) nimmt die Geschwindigkeit am gegenüberliegen-

den Ufer ( $y = 40$  cm) im Allgemeinen um maximal 10% zu. Lenkbuhnen führen folglich zu keiner nennenswerten Vergrößerung des Strömungsangriffs auf das gegenüberliegende Ufer.

Mit den entwickelten Diagrammen können die durch Lenkbuhnen hervorgerufenen Änderungen in der Geschwindigkeitsverteilung auf einfache und praxistaugliche Weise abgeschätzt werden. Die Diagramme zur Abschätzung der induzierten Quergeschwindigkeiten verdeutlichen, dass die Ergebnisse einer gewissen Streubreite unterliegen, wie sie auch im naturnahen Flussbau zu erwarten sind.

### 6.2.3 Einfluss auf die Wassertiefe

Mit Hilfe von Staurohren wurde der Verlauf der Wassertiefen über den Fließweg für jede Versuchsanordnung bestimmt (Kapitel 5.1.3). Es zeigte sich, dass die Lenkbuhnen oberhalb des Einbaubereichs ( $x < 0$  cm) zu einem geringen Aufstau und damit Anstieg der Fließtiefe führen. Im Einbaubereich ( $x = 0$  bis 300 cm) kommt es zu einem beschleunigten Abfluss, unterhalb ( $x > 300$  cm) stellt sich wieder Normalabfluss ein (Bsp. Abb. 6.24).

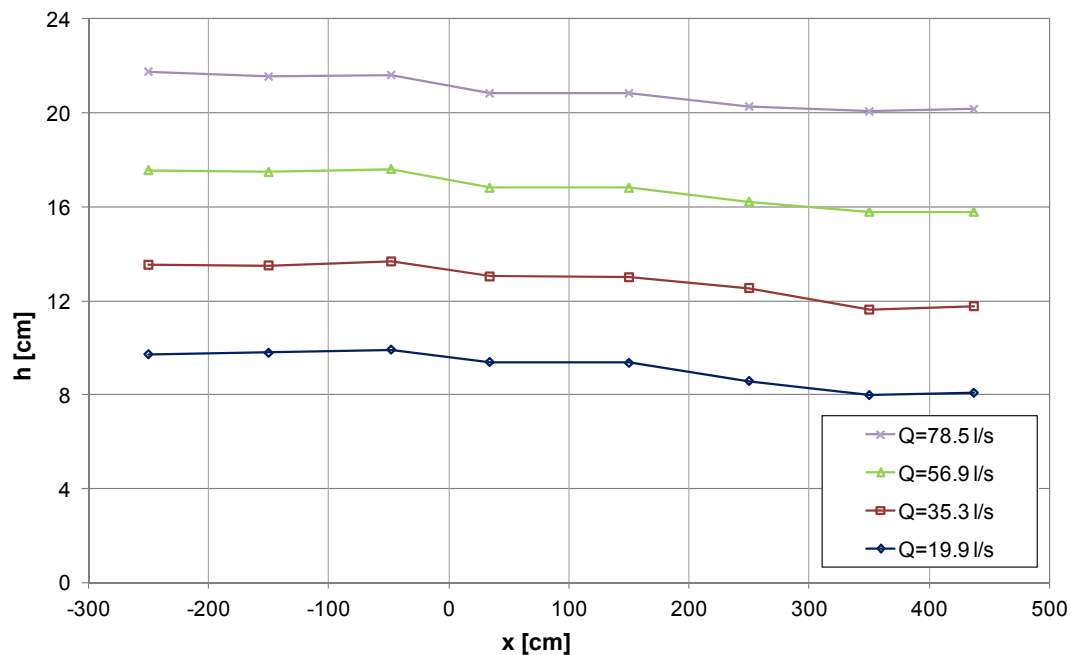


Abb. 6.24: Änderung der Fließtiefe  $h$  mit dem Fließweg (Beispiel:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm,  $H = 1/10$  bis  $1/4$ ; Lenkbuhnen von  $x = 0$  bis 300 cm)

Um den Anstieg der Fließtiefe zu bestimmen, wurde für jede Versuchsanordnung der Mittelwert der drei oberhalb des Einbaubereichs gemessenen Fließtiefen berechnet und denen der Nullmessung ohne Buhnen gegenübergestellt.

Abb. 6.25 zeigt den so bestimmten Anstieg der Fließtiefe  $h$  in Bezug zum relativen Abstand  $A_B$  und zur relativen Höhe  $H$  beispielhaft für den Inklinationswinkel  $\alpha = 60^\circ$ . Die Diagramme für  $\alpha = 30^\circ$  und  $90^\circ$  finden sich in Anhang 7. Wie zu erwarten war, ist der Anstieg der Fließtiefe stark von der relativen Höhe abhängig. Je höher die Lenkbuhne im Verhältnis zur Wassertiefe, umso größer ist der Anstieg. Darüber hinaus zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen

dem relativen Abstand und dem Wasserspiegelanstieg ( $1 - h/h_N$ ), die gut über eine Potenzfunktion beschrieben werden kann (Abb. 6.25, Anhang 7).

Nach Abb. 6.25 ist bei einer Lenkbuhnendimensionierung anhand der in Werdenberg et al. (2012a, b) genannten Faustformeln ( $\alpha = 60^\circ$ ,  $H = 1/10$ ,  $A_B = 1.6 \div 4.0$ ; Kapitel 3.2) mit einem Anstieg der Fließtiefe um etwa 3 bis 6% zu rechnen. Bei  $\alpha = 30^\circ$  liegt der Anstieg mit 2 bis 4.5% sogar etwas niedriger (Anhang 7, Abb. A17). Hierbei ist noch zu berücksichtigen, dass die den Abbildungen zugrunde liegenden Versuche bei fester Sohle durchgeführt wurden. Aufgrund der zu erwartenden Sohleneintiefungen zwischen den Buhnenköpfen bzw. zwischen Buhnenkopf und Innenufer ist mit noch geringeren Anstiegen zu rechnen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Lenkbuhnen zu keinem nennenswerten Anstieg der Fließtiefe führen. Ihre Verwendung ist daher auch unter stark beengten Platzverhältnissen möglich. Sie verursachen unter den genannten Randbedingungen keine Verschärfung der Hochwassersituation.

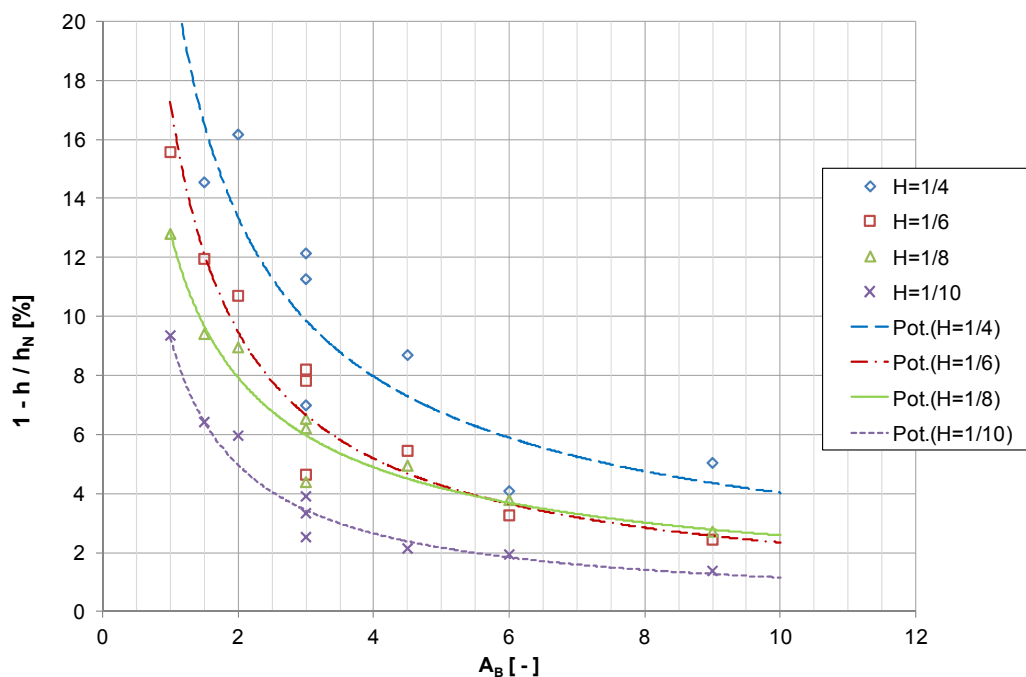


Abb. 6.25: Verhältnis von relativem Abstand  $A_B$  zum Anstieg der Wassertiefe  $h$  bei einem Inklinationswinkel  $\alpha = 60^\circ$

Um Lenkbuhnen auch in hydraulischen Berechnungsverfahren berücksichtigen zu können, wurde ihr Widerstandsbeiwert analog zu Störsteinen in Umgehungsgerinnen und Fischrampen nach DWA (2014) bestimmt. Der Einfluss der Sohlenrauheit wird bei Lenkbuhnen ebenso wie bei eingebauten Störsteinen vom Fließwiderstand der Einbauten überlagert. Wesentliche Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist eine große relative Überdeckung ( $h/k_s > 3 \div 5$ , mit:  $k_s$  = äquivalente Sandrauheit (LfU 2002)), die bei allen Versuchen mit Lenkbuhnen gegeben war. Der Widerstandsbeiwert der verbauten Rinne kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\lambda_{\text{ges}} = \frac{\lambda_B + \lambda_0 \cdot (1 - \varepsilon_A)}{(1 - \varepsilon_V)} \approx \lambda_0 + \lambda_B \quad \text{Gl. 6.3}$$

mit:

$\lambda_{\text{ges}}$  = Widerstandsbeiwert der mit Lenkbuhnen verbauten Rinne [ - ]

$\lambda_B$  = Widerstandsbeiwert der Lenkbuhnen [ - ]

$\lambda_0$  = Widerstandsbeiwert der unverbauten Rinne [ - ]

$$\varepsilon_V = \sum V_B / V_{\text{ges}} = \text{Volumen der Lenkbuhnen über der Sohle} / \text{Gesamtvolumen} \quad \text{Gl. 6.4}$$

$$\varepsilon_0 = \sum A_{0,B} / A_{0,\text{ges}} = \text{Lenkbuhnengrundfläche} / \text{Gesamtgrundfläche des Gerinnes} \quad \text{Gl. 6.5}$$

Um nun den Widerstandsbeiwert  $\lambda_B$  der Lenkbuhnen zu bestimmen, muss zunächst der Widerstandsbeiwert  $\lambda_0$  der unverbauten Rinne berechnet werden. Hierzu wird die Fließformel von Darcy-Weisbach nach  $\lambda_0$  umgeformt:

$$u_m = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{b \cdot h_N} = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_0} \cdot R \cdot I_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{8 \cdot g \cdot \frac{b \cdot h_N}{b + 2 \cdot h_N} \cdot I_0}{\left( \frac{Q}{b \cdot h_N} \right)^2} = \frac{8 \cdot g \cdot I_0}{Q^2} \cdot \frac{(b \cdot h_N)^3}{b + 2 \cdot h_N} \quad \text{Gl. 6.6}$$

$\lambda_0$  kann nun mit den Werten in Tab. 5.3 für jeden der vier untersuchten Abflüsse bestimmt werden (Tab. 6.1).

Tab. 6.1: Widerstandsbeiwerte  $\lambda_0$  der unverbauten Rinne in Abhängigkeit vom Abfluss Q

<b>Q</b> <b>[l/s]</b>	<b>Widerstandsbeiwert <math>\lambda_0</math></b> <b>[ - ]</b>
19.9	0.048
35.3	0.046
56.9	0.038
78.5	0.035

Der Widerstandsbeiwert  $\lambda_B$  der Lenkbuhnen wird dann durch Umformen von Gl. 6.3 berechnet:

$$\lambda_B = \lambda_{\text{ges}} \cdot (1 - \varepsilon_V) - \lambda_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \quad \text{Gl. 6.7}$$



mit:

$$\lambda_{\text{ges}} = \frac{8 \cdot g \cdot l_E}{Q^2} \cdot \frac{(b \cdot h_m)^3}{b + 2 \cdot h_m} \quad \text{Gl. 6.8}$$

$$h_m = \frac{h_o + h_u}{2} \quad \text{Gl. 6.9}$$

$h_o$  = Wassertiefe oberstrom des Lenkbunnenbereichs [m]

$h_u$  = Wassertiefe unterstrom des Lenkbunnenbereichs [m]

$$l_E = \frac{\Delta z + h_o + \frac{u_{m,o}^2}{2 \cdot g} - \left( h_u + \frac{u_{m,u}^2}{2 \cdot g} \right)}{x_u - x_o} \quad \text{Gl. 6.10}$$

$u_{m,o}$  = mittlere Fließgeschwindigkeit oberstrom des Lenkbunnenbereichs [m/s]

$u_{m,u}$  = mittlere Fließgeschwindigkeit unterstrom des Lenkbunnenbereichs [m/s]

$x_o$  = x-Wert oberstrom des Lenkbunnenbereichs [m]

$x_u$  = x-Wert unterstrom des Lenkbunnenbereichs [m]

$$\Delta z = (x_u - x_o) \cdot l_0 \quad \text{Gl. 6.11}$$

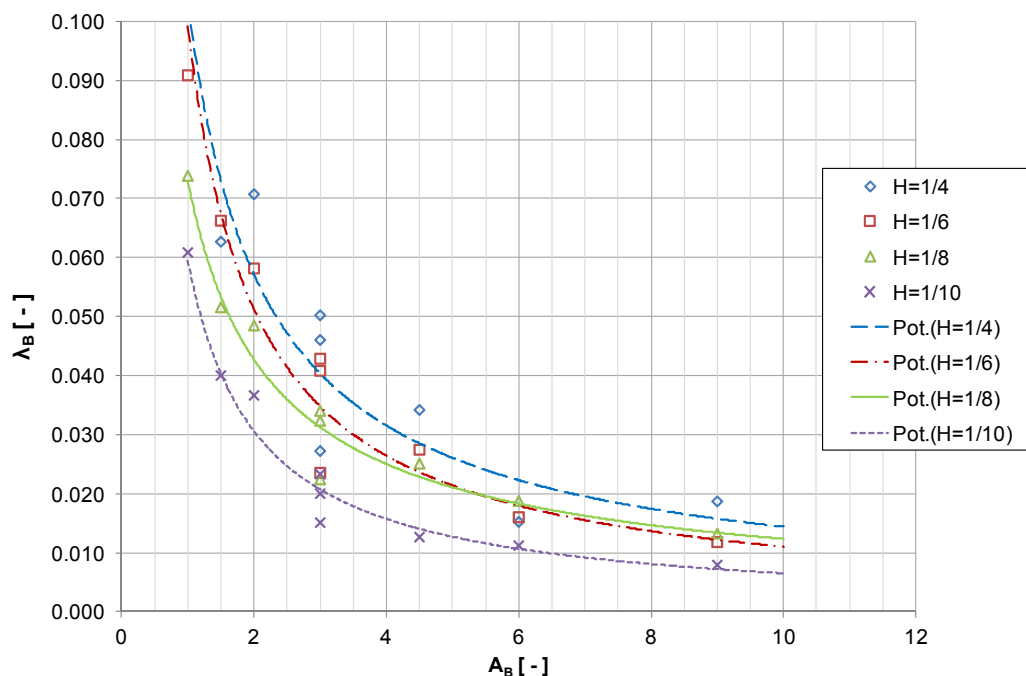


Abb. 6.26: Widerstandsbeiwerts  $\lambda_B$  der Lenkbunnen in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 60^\circ$

Für die nach dem oben beschriebenen Verfahren berechneten Widerstandsbeiwerte der Lenkbunnen  $\lambda_B$  besteht ebenso wie beim Anstieg der Wassertiefe (vgl. Abb. 6.25) eine Ab-

hängigkeit zur relativen Höhe  $H$  und dem relativen Abstand  $A_B$ . Diese Abhängigkeit lässt sich auch hier am besten durch eine Potenzfunktion beschreiben (Abb. 6.26, Anhang 8).

Bei einer Lenkbuhnendimensionierung anhand der in Werdenberg et al. (2012a, b) genannten Faustformeln liegen die Widerstandsbeiwerte der Lenkbuhnen  $\lambda_B$  zwischen ca. 0.015 und 0.040 (Abb. 6.26), der Widerstandsbeiwert der unverbauten Rinne  $\lambda_0$  beträgt 0.035 (Tab. 6.1). Der mit Gl. 6.3 berechnete Widerstandsbeiwert  $\lambda_{ges}$  der mit Lenkbuhnen verbauten Rinne ist damit um 43 bis 114% größer als der Widerstandsbeiwert  $\lambda_0$  der unverbauten Rinne.

Ist der Widerstandsbeiwert  $\lambda_0$  eines unverbauten Fließgewässerabschnitts bekannt, kann mit den Widerstandsbeiwerten  $\lambda_B$  der Lenkbuhnen der Gesamtwiderstandsbeiwert  $\lambda_{ges}$  berechnet werden. Damit kann auch die Fließgeschwindigkeit z.B. mit der Fließformel von Darcy-Weisbach (Gl. 6.6) grundsätzlich berechnet werden. Für unbewegliche (z.B. felsige) Sohlen kann die Fließgeschwindigkeit so gut abgeschätzt werden. Bei beweglichen Sohlen ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich durch den Einbau von Lenkbuhnen nicht nur die Rauheit des betrachteten Gewässerabschnitts, sondern auch seine Geometrie ändert. Für bewegliche Sohlen kann daher aus den Versuchen noch kein Verfahren zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit abgeleitet werden.

#### **6.2.4 Fazit**

Die Versuchsergebnisse bestätigen nochmals die abgeleitete Aussage, dass die Leitelementtheorie des IIHR nicht auf Lenkbuhnen übertragbar ist. Insbesondere zeigte sich, dass die relative Höhe nur geringfügigen Einfluss auf die Stärke der induzierten Sekundärströmung als auch die Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit am Buhnenufer hat. Dies steht in deutlichem Widerspruch zur genannten Theorie.

Mit den Versuchen konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass mit Lenkbuhnen, trotz ihrer geringen Höhe, große Veränderungen der Geschwindigkeitsverteilung hervorgerufen werden. Die Geschwindigkeit am zu schützenden Ufer kann um etwa 30% reduziert und die Uferbelastung damit etwa halbiert werden. Ebenso ermöglichen es Lenkbuhnen, die kurveninduzierte Sekundärströmung in Prallufnähe bei fast allen in der Natur vorkommenden Kurvengeometrien vollständig zu neutralisieren, da diese in der Regel wesentlich schwächer ist als die durch Lenkbuhnen induzierte Sekundärströmung.

Wie im folgenden Kapitel gezeigt wird, stellen die entwickelten Diagramme mit den Abhängigkeiten zwischen dem relativen Abstand und der induzierten relativen Quergeschwindigkeit bzw. Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit ein geeignetes, praxisnahes Instrument zur Bemessung der Lenkbuhnen dar.

## 7 Bemessungsregeln

### 7.1 Grundsätze

#### 7.1.1 Höhe

Wie in Kapitel 6.2 gezeigt wurde, ist der Einfluss der relativen Höhe  $H$  auf die induzierte Sekundärströmung und die Änderung der Geschwindigkeitsverteilung gering. Das bedeutet, niedrige Lenkbuhnen ( $H = 1/10$ ) haben nahezu die gleiche uferschützende Wirkung wie höhere. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wird empfohlen, Lenkbuhnen möglichst niedrig zu bauen. Aus der geringen Höhe resultieren zahlreiche Vorteile:

- Niedrige Lenkbuhnen führen zu einem geringen bis vernachlässigbaren Wasserspiegelanstieg, wodurch die Ausuferungsgefahr nicht oder nur unwesentlich verschärft wird (Kapitel 6.2.3). Niedrige Lenkbuhnen können daher in der Regel auch unter beengten Platzverhältnissen wie in Ortslagen zur Uferstabilisierung aber auch zur Strukturierung eingesetzt werden.
- Je niedriger die Lenkbuhne, umso kleiner ist der Materialbedarf.
- Aus einer geringen Bauwerkshöhe resultieren kleinere Bauwerkskolke, die Versagensgefahr des Bauwerks sinkt.
- Die Strömung im Umfeld niedriger Lenkbuhnen ist bei starker Überströmung im Hochwasserfall nur wenig beschleunigt. Im Gegensatz dazu kommt es bei höheren Buhnen zu stark beschleunigten Abflüssen auf den Buhnenrücken, woraus insbesondere nahe der Buhnenwurzel eine erhöhte Uferbelastung resultieren kann.
- Niedrige Lenkbuhnen werden ständig überströmt und daher nicht als Fremdkörper im Landschaftsbild wahrgenommen (Kapitel 3.8.1). Die ständige Überströmung bietet darüber hinaus ökologische Vorteile: Hinter den Lenkbuhnen bildet sich bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss eine bewegte, häufig mit lokalem Weißwasser verbundene Wasseroberfläche. Diese Strömungsverhältnisse dienen zahlreichen Fischarten als Deckungsstruktur (Newton et al. 1998) und werten die Kolke unterhalb der Lenkbuhnen zusätzlich ökologisch auf. Die Kolke im Umfeld der Lenkbuhnen stellen daher gute Fischeinstände dar (Kapitel 3.8.2).

Auch Rosgen (2006) empfiehlt die Verwendung niedriger Gewässereinbauten, die das natürliche Energieliniengefälle eines Flusses nicht nennenswert ändern. Sind die Einbauten zu hoch, führen sie zu einem Rückstau und verringern das Energieliniengefälle oberhalb. Dadurch neigt der Fluss zu einem höheren Windungsgrad (Abb. 7.1), der definiert ist als das Verhältnis von Lauflänge zu Talweg (Scherle 1999), und die Gefahr von Seitenerosion nimmt zu.

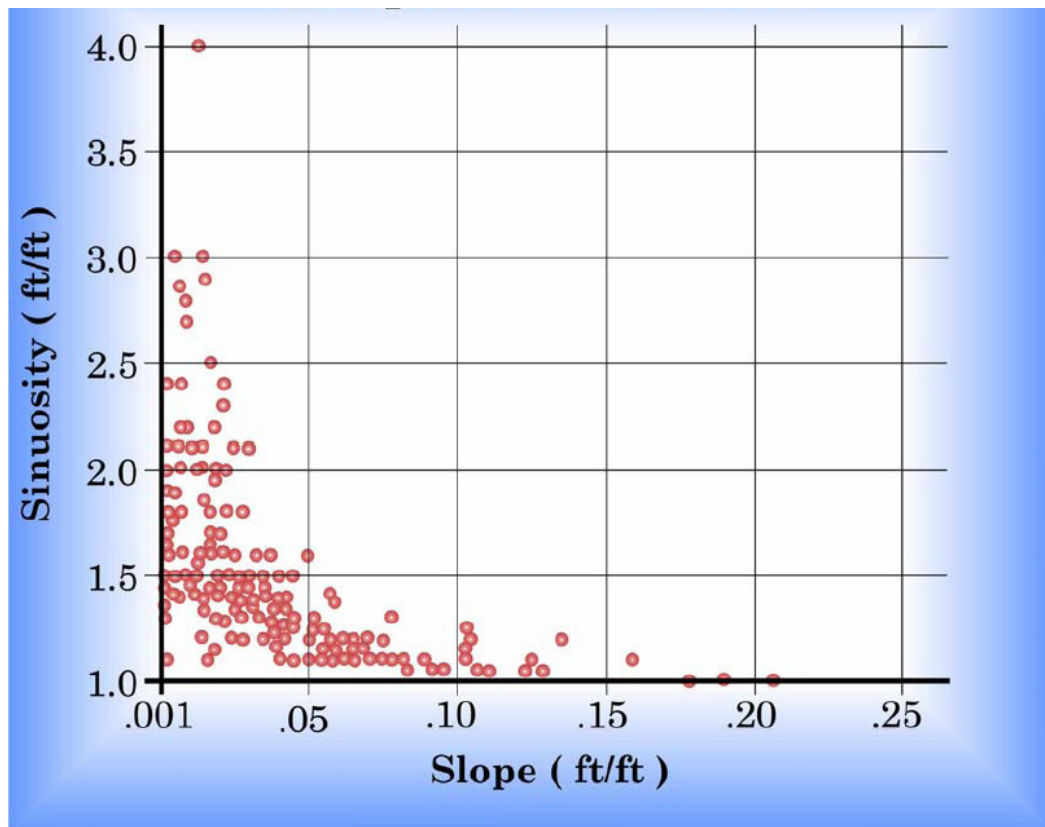


Abb. 7.1: Zusammenhang zwischen Gefälle und Windungsgrad (engl. *Sinuosity*) in natürlichen Flüssen (Rosgen 2006)

Als Bezugsniveau zur Berechnung der Höhenlage der Lenkbuhnen hat sich in der Praxis die „Neutrale Sohlenlage“ etabliert (Mende & Koll 2006), die auch als „mittlere Sohlenebene“ bezeichnet werden kann. Die mittlere Sohlenebene ist eine über die Sohlenbreite und die Fließstrecke gemittelte Sohlenlage. Zur Bestimmung der mittleren Sohlenebene wird zunächst für jedes vorhandene Querprofil des Einbauabschnitts (inkl. einer Strecke ober- und unterhalb des Abschnitts von jeweils etwa der 10fachen Sohlenbreite) die mittlere Sohlenlage berechnet. In einem weiteren Schritt wird dann ein Längenprofil der mittleren Sohlenlage erstellt und eine lineare Näherungsfunktion bestimmt, mit der für jede beliebige Station des Untersuchungsgebiets die lokale Höhenkote auf der mittleren Sohlenebene berechnet werden kann (Abb. 7.2).

Zur Berechnung der Höhenlage geplanter Lenkbuhnen wird zunächst mit Hilfe der Näherungsfunktion die Höhenkote der mittleren Sohlenebene am Einbauort berechnet und dann die gewählte Höhe der Buhne addiert. Durch diese Vorgehensweise kann die Höhenlage der einzelnen Lenkbuhnen optimal aufeinander abgestimmt werden.

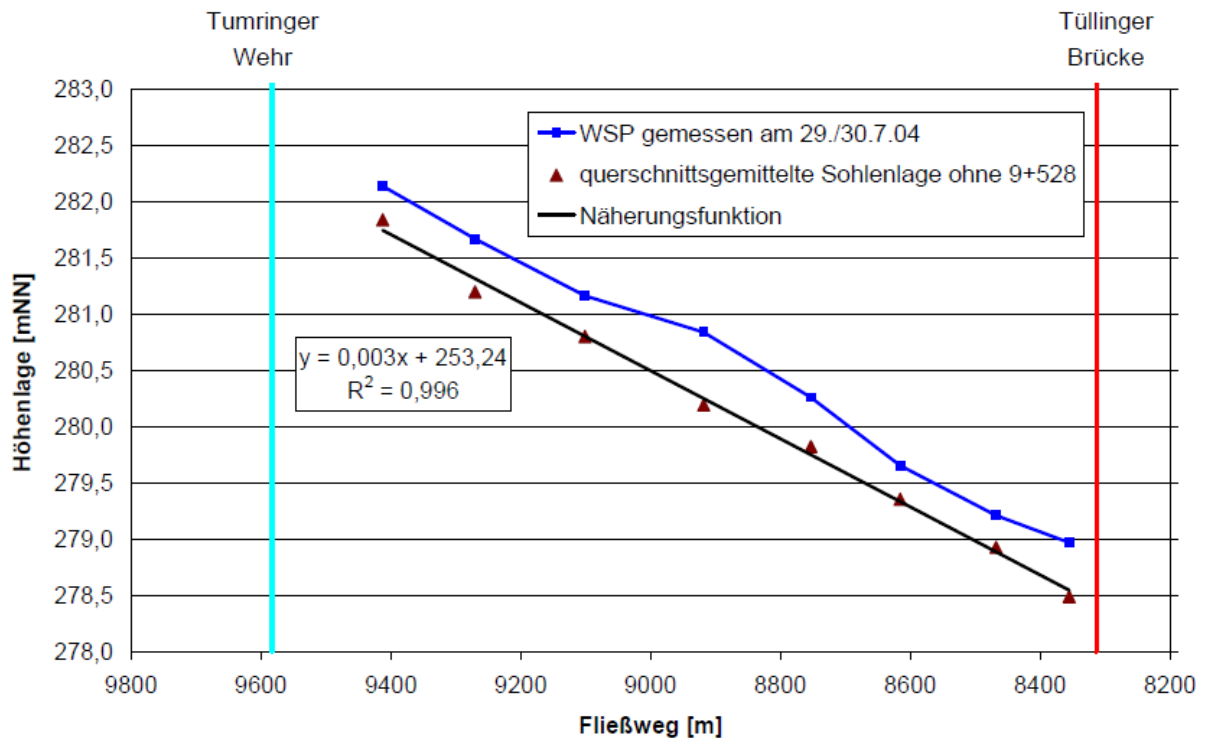


Abb. 7.2: Längsprofil der Wiese im Stadtgebiet von Lörrach mit der Näherungsfunktion „mittlere Sohlenebene“ (Mende & Koll 2006)

### 7.1.2 Länge

Zentrale Größe bei der Bemessung von Lenkbuhnen ist der relative Abstand  $A_B$ . Bei gleichem relativem Abstand sinkt die Zahl der notwendigen Lenkbuhnen mit zunehmender projizierter Buhnenlänge  $l_p$ . Je größer die gewählte Länge ist, umso weniger Buhnen müssen gebaut werden.

Der Materialbedarf einer Lenkbuhne setzt sich zusammen aus dem Bedarf für die Blocksteinreihe und die Anbindung an das Ufer (Abb. 3.12). Werden Lenkbuhnen in Kurvenkolken eingebaut, müssen sie hier zusätzlich, je nach Kolkentiefe, durch einen ein- oder mehrreihigen Blocksteinaufbau fundiert werden (Abb. 7.3). Außerhalb des Kolks reicht in der Regel ein einreihiger Aufbau, da die Sohle zum Innenufer hin ansteigt. Der Blocksteinbedarf je Laufmeter Lenkbuhne nimmt daher, sofern die Buhne über den Kolkbereich hinaus gebaut wird, von der Buhnenwurzel zum -kopf stark ab.

Insbesondere in Flusskrümmungen mit Kurvenkolken gilt daher, dass der Materialbedarf je Laufmeter geschütztem Ufer mit steigender projizierter Buhnenlänge deutlich sinkt. Grundsätzlich gilt diese Aussage aber auch für gerade Flussstrecken, da der Anteil der Anbindung am Gesamtmaterialbedarf einer Lenkbuhne ebenfalls mit zunehmender Länge sinkt.

## Thur – Eggrankkurve

### Längsschnitt Lenkbuhne 1 : 100

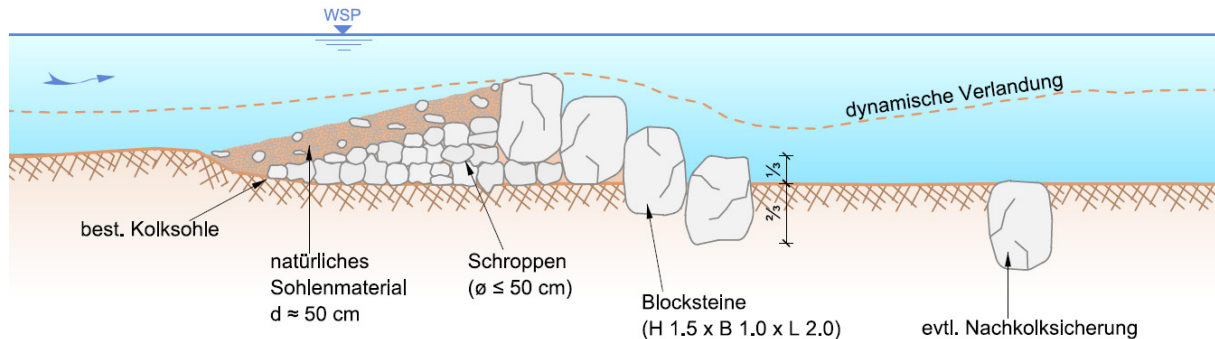


Abb. 7.3: Lenkbuhnenaufbau bei Einbau in Kurvenkolk (IUB Engineering AG 2013)

Es ist daher vorteilhaft, möglichst lange Lenkbuhnen zu verwenden. Neben dem geringeren Materialbedarf und den damit verbundenen geringeren Baukosten bieten lange Lenkbuhnen auch ökologische Vorteile. Sie führen zu einer großräumigen Strukturierung der Sohle, kurze Buhnen wirken sich dagegen nur ufernah aus.

Die große Buhnenlänge darf jedoch nicht zu einer Gefährdung des gegenüber den Lenkbuhnen liegenden Ufers führen. Diese Gefahr besteht vor allem in Flusskrümmungen, in denen Lenkbuhnen einseitig zum Schutz des Prallufers eingebaut werden.

Mit den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass die Fließgeschwindigkeit außerhalb der Lenkbuhnen in geraden Strecken nur unwesentlich zunimmt. Selbst bei der größten untersuchten Länge  $l_p = 0.6 b_{so}$  nahm die Geschwindigkeit in der Regel nur um maximal 10% zu (Kapitel 6.2.2).

Bei **einseitiger Lenkbuhnenanordnung** in Flusskrümmungen ist dagegen eine größere Zunahme der Fließgeschwindigkeit zwischen den Buhnenköpfen und in diesem Fall dem Innenufer zu erwarten. Sie ist jedoch nicht primär auf die im Labor untersuchte Lenkbuhnenwirkung, sondern vielmehr auf die durch die Lenkbuhnen hervorgerufene starke Querschnittsverringering im Kolkbereich zurückzuführen.

Der Lenkbuhneneinbau kommt quasi einem linearen, quer zum Ufer gerichteten Kolkverbau gleich. Die Kolkbereiche zwischen den Lenkbuhnen landen infolge der lenkbuhneninduzierten Sekundärströmung auf. Am Innenufer kommt es dagegen zu einem Sohlenabtrag (Abb. 3.17), die durchströmte Querschnittsfläche, der breitenspezifische Abfluss, d. h. der Abfluss pro laufender Meter Sohlenbreite und die Fließgeschwindigkeit nehmen zu.

Aufgrund der großen Ähnlichkeiten der Wirkungsweise von Lenkbuhnen und Leitelementen kann davon ausgegangen werden, dass die durchströmte Querschnittsfläche nach Einbau

der Lenkbuhnen und erfolgtem Abtrag am Innenufer wie bei den Untersuchungen von Odgaard & Wang (1991) etwa der Ausgangssituation entspricht.

Die Größe des Abtrags am Innenufer hängt dann von dem durch die Lenkbuhne verbauten Querschnittsanteil, also von der Höhe und Länge der Buhne ab. Werden die Lenkbuhnen beispielsweise 20 cm hoch und über die Hälfte der Sohlenbreite eingebaut, tieft sich die Sohle, unter Annahme einer unveränderlichen Sohlenbreite, zwischen Lenkbuhnenkopf und Innenufer im Mittel um etwa 20 cm unter das Niveau der ausgeglichenen Sohlenlage (Abb. 7.2) ein. Werden die Lenkbuhnen über 2/3 der Sohlenbreite eingebaut, ist die Eintiefung bereits doppelt so groß.

Bei der Festlegung der Buhnenlänge und auch der Buhnenhöhe (Abschnitt 7.1.1) ist daher zu überprüfen, welche Eintiefung am Innenufer tolerierbar ist. In den meisten Fällen sind Eintiefungen um einige Dezimeter unproblematisch, da Ufersicherungen wie z.B. ein Blocksatzverbau bis weit unter die mittlere Sohlenlage fundiert sind. Bei ungesicherten Innenufern können Eintiefungen und damit ggf. verbundene leichte Ufererosionsprozesse in der Regel toleriert werden.

Die in Grober (1998) gewählte Länge  $l_P \approx 2/3 b_{So}$  (Abb. 3.17) stellt daher für die meisten Lenkbuhnen in Krümmungen einen guten Orientierungswert dar. Müssen Ufererosionsprozesse an ungesicherten Innenufern zwingend vermieden werden, sollte die Länge auf  $l_P = 1/2 b_{So}$  reduziert werden, wie es auch Werdenberg et al. (2012a, b) empfehlen. Beide Empfehlungen setzen möglichst niedrige Lenkbuhnen voraus (Abschnitt 7.1.1). Über 2/3  $b_{So}$  hinaus gehende Buhnenlängen sollten nur dann gewählt werden, wenn Ufererosion am Innenufer toleriert werden kann oder gewünscht ist.

Bei **beidseitiger Lenkbuhnenanordnung** in geraden Gewässerabschnitten treten Eintiefungen zwischen den Buhnenköpfen auf, wodurch eine Ufergefährdung ausgeschlossen werden kann. Aus oben genannten Gründen werden auch für gerade Abschnitte möglichst lange Lenkbuhnen empfohlen. Da das Maß der Eintiefung zwischen den Buhnenköpfen jedoch mit der Buhnenlänge steigt, führen zu lange Lenkbuhnen zu einer naturfernen Querprofilgeometrie mit tief eingeschnittenem Talweg, der darüber hinaus eine tiefe Fundierung der Lenkbuhnen nötig macht.

In der Praxis hat sich bei beidseitigen Lenkbuhnen das Drittelprinzip bewährt (Kapitel 3.2.2.2). Die beiden Lenkbuhnen werden in der Summe über etwa 2/3 der Sohlenbreite eingebaut. Wie bei einseitiger Buhnenanordnung tieft sich die Sohle um etwa die doppelte Buhnenhöhe unter die neutrale Sohlenlage ein. Bei z.B. 20 cm hohen Buhnen ist folglich mit einer Eintiefung um etwa 40 cm zu rechnen. Eine solche Eintiefung kann insbesondere in strukturarmen Fließgewässern mit ebener Sohle eine deutliche ökologische Aufwertung des Lebensraums bewirken. Da sich der Abfluss in der rinnenartigen Eintiefung konzentriert, stehen den Fischen hier insbesondere in Niedrigabflussphasen ausreichende Fließtiefen zur Verfügung. Darüber hinaus wird durch die Rinnenbildung der Anstieg der Wassertemperatur minimiert.

Das Drittelprinzip wird daher bei beidseitiger Lenkbuhnenanordnung empfohlen. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Buhnenlängen immer leicht variieren, wodurch das Erscheinungsbild naturnah und wenig mechanisch wirkt. Dies gilt selbstverständlich auch bei

einseitiger Anordnung. Durch die Variation wird neben der Aufwertung des Erscheinungsbilds auch die Strömungsvielfalt erhöht, woraus wiederum eine ökologische Aufwertung resultiert.

### 7.1.3 Abstand

Mit den Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die ufernahe Fließgeschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich auch bei großen relativen Abständen nennenswert verringert werden kann (Bsp.  $A_B = 6$ , Verringerung  $\bar{u}$  ( $y = 3 \text{ cm}$ )  $\approx 20\%$  (Abb. 6.19)). Es wird erwartet, dass diese Verringerung bei beweglicher Sohle noch größer ist, da sich die Sohle entlang der Buhnenköpfe eintiefen wird. Der Abfluss konzentriert sich daher entlang der bzw. zwischen den Buhnenköpfen, die Ufer werden zusätzlich entlastet.

Auch die induzierten relativen Quergeschwindigkeiten sind im ufernahen Lenkbuhnenbereich bei großem  $A_B$  noch so groß, dass sie im Bereich üblicher relativer Quergeschwindigkeiten in Krümmungen liegen (Bsp.  $A_B = 6$ :  $c = 5 \div 10\%$  (Abb. 6.16 und Abb. 6.17)). Die krümmungsinduzierte Sekundärströmung in Ufernähe könnte folglich zumindest bei der Mehrzahl der Kurven auch bei großem  $A_B$  durch die Lenkbuhnen aufgehoben werden.

Trotz des auch bei großem  $A_B$  nachgewiesenen Einflusses der Lenkbuhnen auf die Strömung wird empfohlen, bei der Verwendung von Lenkbuhnen in Fließgewässern eher kleinere relative Abstände zu wählen. Die Strömungsverhältnisse in ausgebauten und insbesondere in naturnahen Fließgewässern sind weit komplexer als in einer geraden Laborrinne mit fester Sohle. Es sind daher bei der Festlegung des Buhnenabstands Unwägbarkeiten zu berücksichtigen, die zu einem verstärkten Strömungsangriff auf zu schützende Ufer führen können. Zu nennen sind insbesondere morphologische Veränderungen wie die Bildung von Kiesbänken, die auch in geraden Gewässerabschnitten zu ungleichmäßig über die Breite verteilten Fließgeschwindigkeiten führen.

Aufgrund der in der Praxis zu berücksichtigenden Unwägbarkeiten kann aus den Laboruntersuchungen kein exakter maximaler Buhnenabstand hergeleitet werden. Die Versuche plausibilisieren jedoch die aus Praxiserfahrungen abgeleiteten, in Werdenberg et al. (2012a, b) zusammengestellten Empfehlungen zum Abstand in Kurven, wonach bei engen Kurven ( $r < 3b$ )  $A_B$  einen Wert von 2, in weiten Kurven ( $r > 8b$ ) einen Wert von 4 nicht unterschreiten sollte (Kapitel 3.2.2.1).

In geraden Gewässerstrecken kann der Abstand grundsätzlich größer als in Kurven gewählt werden, da keine erhöhte Verlagerungstendenz des Stromstrichs ans Ufer besteht. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der Empfehlungen von Werdenberg et al. (2012a, b) für das Anwendungsgebiet Flusskurven wird für gerade Strecken ein maximaler relativer Abstand von 6 empfohlen. Damit ergibt sich unter Anwendung des Drittelprinzips (Kapitel 7.1.2) ein Lenkbuhnenabstand von maximal zwei Sohlenbreiten. Steht in geraden Gewässerstrecken nur die morphologische Aufwertung im Vordergrund, können auch größere relative Abstände gewählt werden.

Wie bei der Länge (Kapitel 7.1.2) sollte auch der Abstand innerhalb einer Lenkbuhnenstrecke leicht variieren, um ein naturnahes Erscheinungsbild und Strömungsvielfalt zu erzielen.



#### **7.1.4 Inklinationswinkel**

Bei gleicher projizierter Länge ist die wahre Länge bei einem Inklinationswinkel von 30° um ca. 70% größer als bei 60°. Der Materialbedarf ist daher bei 30° wesentlich größer als bei 60°.

Unter ansonsten gleicher Anordnung reduzieren Lenkbuhnen mit einem Inklinationswinkel von 60° die ufernahe Fließgeschwindigkeit im Lenkbuhnenbereich etwas stärker als solche mit 30° (Kapitel 6.2.2). Die induzierte Quergeschwindigkeit ist dagegen bei einem Winkel von 30° größer (Kapitel 6.2.1), wobei auch hier die Unterschiede zu 60° wenig ausgeprägt sind.

Da sich die Wirkung von Lenkbuhnen auf die Strömung zwischen 30° und 60° nur geringfügig unterscheidet, der Materialbedarf und die damit verbundenen Baukosten jedoch bei 30° weit höher sind, wird für Lenkbuhnen ein Inklinationswinkel von 60° empfohlen. 60°-Buhnen sind für die meisten Anwendungsgebiete ausreichend. Lediglich bei sehr engen Kurven mit großen auftretenden Quergeschwindigkeiten kann die Verwendung von 30°-Buhnen notwendig sein, wenn 60°-Buhnen die kurveninduzierte Sekundärströmung nicht mehr neutralisieren können oder eine größere Sicherheit erforderlich ist.

Ebenso wie die Länge und der Abstand sollte auch der Inklinationswinkel von Buhne zu Buhne um wenige Grad ( $\pm 5^\circ$ ) variiert werden. Zusätzlich wird die Wahl einer leicht geschwungenen oder gebogenen Buhnenachse empfohlen (vgl. Abb. 3.12). Aus den Untersuchungen von Marelius & Sinha (1998; Kapitel 4.3) lässt sich ableiten, dass diese Variationen nur wenig Einfluss auf die induzierte Sekundärströmung und die Geschwindigkeitsverteilung haben. Sie wirken sich jedoch positiv auf die Strömungsvielfalt und das Erscheinungsbild aus.

### **7.2 Bauwerksstabilität**

#### **7.2.1 Steingrößen**

Bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur werden in der Regel Blocksteine mit einer Masse von mindestens 5 Tonnen verwendet, die Kantenlängen betragen etwa 1.5 m (Abb. 3.12). Bei großen Gewässern wie der Mur werden Steine mit einer Masse von 5 bis 10 Tonnen eingebaut. Die Steingröße wird anhand von Erfahrungswerten festgelegt. Bewährt haben sich unbehauene, möglichst kubische Steine (Kapitel 3.5.1). Sie weisen eine erhöhte Standfestigkeit auf und ermöglichen einen guten Steinverbund. Durch die Wahl großer Steine, die mindestens bis zu ihrer halben Höhe in die anstehende Sohle eingebunden werden, kann vielfach auf einen zusätzlichen Stützstein zur Nachkolkssicherung verzichtet werden (s.a. Kapitel 7.2.2). Dies erleichtert den Einbau, erhöht die Standsicherheit der Lenkbuhne und ermöglicht die Ausbildung verhältnismäßig tiefer, aus ökologischen Gründen gewünschter Bauwerkskolke.

Liegen keine Erfahrungswerte vor, können die erforderlichen Steingrößen durch Bemessungsansätze bzw. -diagramme festgelegt werden.

Für kleinere Fließgewässer mit bordvollen Abflüssen zwischen 0.5 und 114 m<sup>3</sup>/s, mittlere bordvolle Fließtiefen zwischen 0.3 und 1.5 m und Sohlschubspannungen bis 25 kg/m<sup>2</sup> (ent-

spricht ca.  $250 \text{ N/m}^2$ ) stellt das Bemessungsdiagramm von Rosgen (2001) eine einfache Möglichkeit dar, den erforderlichen Steindurchmesser abzuschätzen (Abb. 7.4).

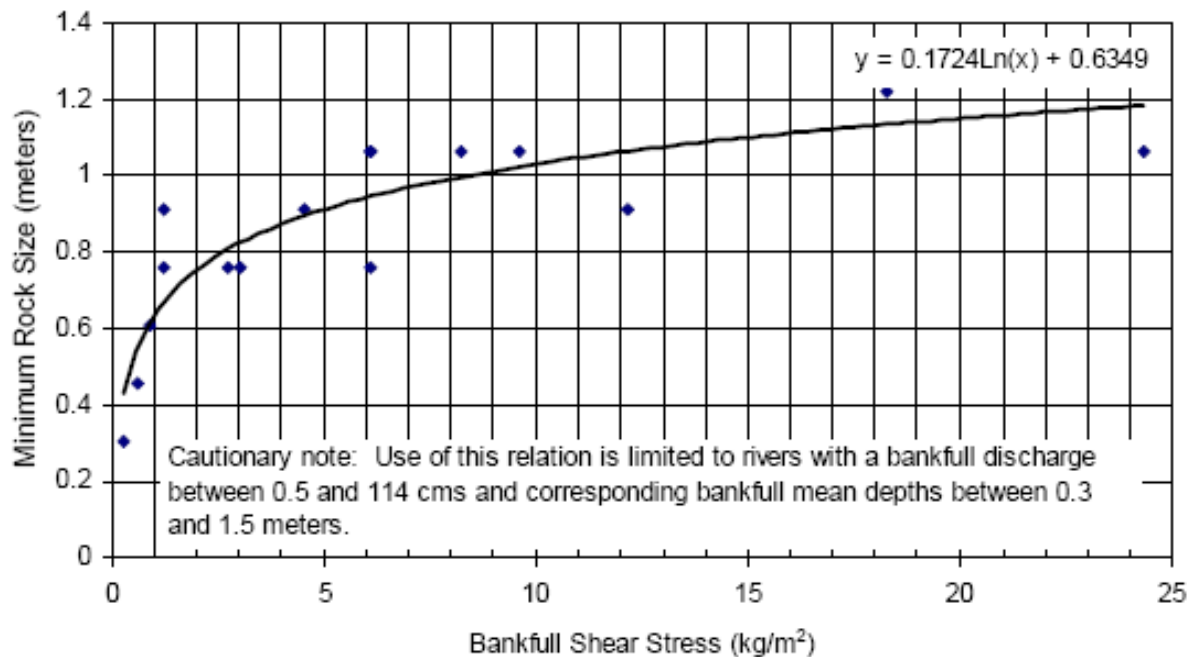


Abb. 7.4: Minimaler Steindurchmesser als Funktion der Schubspannung bei bordvollem Abfluss (Rosgen 2001)

Ein physikalisch hergeleitetes und für alle Fließgewässer anwendbares Verfahren ist das zur Bemessung der erforderlichen Riegelsteingröße bei Riegelrampen (LfU 2000). Bei diesem Bemessungsverfahren wird zur Ermittlung der Standfestigkeit eines Riegel- bzw. Lenkbuhnensteins von einem Kräftegleichgewicht zwischen

- der durch die Strömung auf das Element ausgeübten Strömungskraft  $P$  [N],
- der hangabwärtsgerichteten Komponente  $G_P$  der Gewichtskraft unter Auftrieb  $G$  [N] und
- der Haftreibungskraft  $R$  [N], die das Element der Strömungskraft  $P$  und der hangabwärtsgerichteten Komponente  $G_P$  der Gewichtskraft entgegensetzt,

ausgegangen (Abb. 7.5):

$$P + G_P = R$$

Gl. 7.1

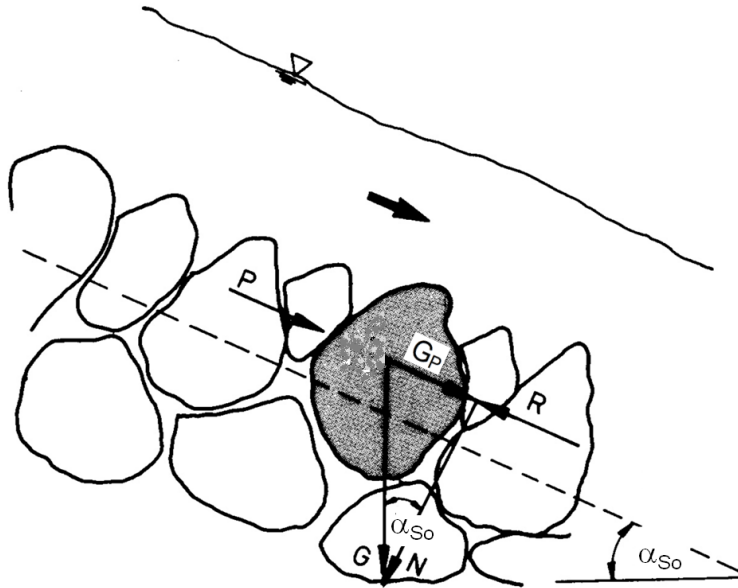


Abb. 7.5: Vereinfachtes Kräftegleichgewicht am Einzelstein (LfU 2000, modifiziert)

Die genannten Kräfte werden wie folgt berechnet:

$$P = \rho \cdot A_S \cdot u^2 \quad \text{Gl. 7.2}$$

$$G_P = G \cdot \sin \alpha_{So} \quad \text{Gl. 7.3}$$

$$R = G \cdot \tan \varphi \cdot \cos \alpha_{So} \quad \text{Gl. 7.4}$$

mit:

$A_S$  = angeströmte Steinfläche [m<sup>2</sup>]

$u_b$  = Anströmgeschwindigkeit beim Bemessungsabfluss  $Q_b$  [m/s]; unter Vernachlässigung der räumlichen Heterogenität kann näherungsweise  $u_b = \tilde{u}_b$  gesetzt werden, mit  $\tilde{u}_b$  = über die Wassertiefe gemittelte Geschwindigkeit in Fließrichtung beim Bemessungsabfluss  $Q_b$  [m/s] (ggf. sollte ein Sicherheitsbeiwert verwendet werden, z. B.  $u_b = 1.5 \cdot \tilde{u}_b$ )

$\alpha_{So}$  = Neigungswinkel der Sohle [°]

$\varphi$  = innerer Reibungswinkel des Riegels [°] ( $\approx 35^\circ$ )

Bei dem Bemessungsverfahren wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der halbe Stein angeströmt wird. Damit ist

$$A_S = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_S^2 \quad \text{Gl. 7.5}$$

mit:

$d_S$  = äquivalenter Steindurchmesser [m]

Bei Gewässern mit geringer Sohlenneigung ist der Neigungswinkel der Sohle  $\alpha_{So} \approx 0$ , damit kann  $G_P$  vernachlässigt werden (s.a. Bemessungsbeispiel in Anhang 9).

### 7.2.2 Kolkschutz

Liegt die Sohle an der Einbaustelle eines Lenkbuhnenblocksteins so tief, dass die Einbindetiefe von mindestens der halben Steinhöhe beim Setzen des Steins auf die vorgesehene Einbaukote nicht eingehalten wird, ist je nach Wassertiefe mindestens ein Stützstein einzubauen. Der Stützstein ist ebenfalls mindestens zur Hälfte in die anstehende Sohle einzubinden. Er sollte ca. 50 bis 80 cm unter der Buhnenoberkante liegen, um eine gewisse, aus ökologischen Gründen gewünschte Kolkbildung zu ermöglichen (Glüh 2005).

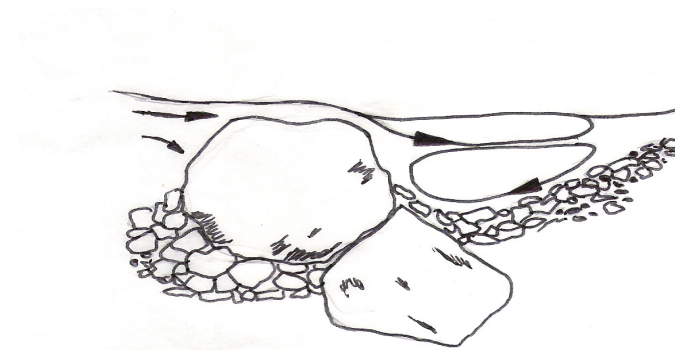


Abb. 7.6: Lenkbuhnenaufbau mit Stützstein zur Nachkolkssicherung (Glüh 2005)

Bei großen Wassertiefen wie in den Kurvenkolken großer Talflüsse muss die Nachkolkssicherung mehrreihig aufgebaut werden, um die erforderliche Einbindung in die anstehende Sohle zu erreichen (Abb. 7.3). Beim Einbau wird zunächst der unterste Stützstein in die anstehende Sohle eingebunden und die Lenkbuhne von unten nach oben aufgebaut. Der genaue Einbau der Steine unter Wasser ist anspruchsvoll, da der Baggerfahrer die Steine nicht sieht und ihre Lage nur mit Hilfe des Baggerarms abschätzen muss. Um Strömungen durch die Blocksteinlücken und damit verbundene Geschiebeausträge zu vermeiden, wird oberhalb der Blocksteine gebrochenes Material (schweizerisch Schroppen (Abb. 7.3)) mit Korngrößen von 63 bis 500 mm eingebaut, das die Lücken verschließt.

Auf eine Vorkolkssicherung durch einen Blockstein oberstrom des obersten Lenkbuhnensteins wird bei der Baubezirksleitung Bruck an der Mur verzichtet. Die bisherige Praxiserfahrung zeigt, dass sich an Lenkbuhnen keine nennenswerten Vorkolke bilden (Mitteilung O. Grober 2012).

### 7.2.3 Uferanbindung

Der Anbindung an das Ufer kommt für die Standsicherheit der Lenkbuhne und die Uferstabilität eine hohe Bedeutung zu.

Bei einem unverbauten Ufer wird der Lenkbuhnenriegel zur Vermeidung eines Hinterspülens der Buhnenwurzel mindestens 1.5 Meter tief in das Ufer eingebunden. Unterstrom der Lenkbuhne werden zwischen Riegel und Ufer auf einer Länge von etwa 3 bis 4 m Kolkschutzsteine eingebaut (Abb. 3.12). Sie liegen rund 50 bis 80 cm tiefer als die Riegelsteine und verhindern bei allen Abflusszuständen eine ufergefährdende Kolkbildung.

Werden Lenkbuhnen vor einen bestehenden Blocksatz gebaut, muss die Buhnenwurzel bündig anschließen. Andernfalls ist mit einem Hinterspülen der Wurzel zu rechnen. Die weitere Anbindung entspricht der bei unverbautem Ufer.

### **7.3 Gerade Gewässerabschnitte**

Der Einsatz von Lenkbuhnen zum Uferschutz verfolgt das Ziel, die auf eine Uferböschung wirkende hydraulische Belastung so weit zu reduzieren, dass keine zusätzlichen Uferschutzmaßnahmen notwendig sind oder zumindest auf „harte“ und kostenintensive Bauweisen wie z.B. Steinschüttungen verzichtet werden kann (Kapitel 1.2). Durch die Reduzierung der Belastung können auch in Bereichen ursprünglich großer Belastung ( $\tau > 140 \text{ N/m}^2$ , Tab. 2.1) vermehrt naturnahe ingenieurbioökologische Bauweisen verwendet werden. Ohne die belastungsreduzierende Wirkung der Lenkbuhnen müssten diese Bauweisen in der Regel mit flächig eingebauten, toten Baustoffen (Steinwurf, Steinschüttung, Steinsatz) kombiniert werden (Johannsen & Burmeister 2008, Stowasser 2011).

Für die Dimensionierung von Lenkbuhnen in geraden Gewässerabschnitten und die Festlegung von evtl. mit ihnen zu kombinierenden ingenieurbioökologischen Bauweisen wird folgendes Vorgehen empfohlen:

#### **Schritt 1: Bestimmung der hydraulischen Belastung auf Sohle und Ufer am Einbauort**

Wie bei der Planung ingenieurbioökologischer Bauweisen (Johannsen & Burmeister 2008) ist der betrachtete Gewässerabschnitt auch bei der Planung von Lenkbuhnen im Gesamtzusammenhang zu sehen. Neben allgemeinen gewässermorphologischen Betrachtungen (z.B. Erosionstendenz, Sedimentationstendenz) spielt eine gründliche Begehung und Beurteilung des Planungsbereichs inkl. seines Umfelds eine wichtige Rolle. Zu beurteilen sind unter anderem die lokalen Strömungsverhältnisse (z.B. „Düseneffekte“ durch Engstellen) oder die Ursachen vorhandener Uferabbrüche.

Nach dieser grundsätzlichen Beurteilung des Planungsbereichs dienen hydraulische Berechnungen als Grundlage für eine anwendungsbezogene Planung der Lenkbuhnen. Analog zu den Empfehlungen von Johannsen & Burmeister (2008) wird auch für Lenkbuhnen bei ungleichförmigen Strömungsverhältnissen eine 1D-Wasserspiegellagenberechnung dringend empfohlen, da hier mit lokal stark variierenden hydraulischen Belastungen zu rechnen ist.

Die hydraulische Belastung der Ufer wird, ebenso wie die Belastbarkeiten von Ufersicherungen, entweder in Form einer Schubspannung oder einer Fließgeschwindigkeit beschrieben (z.B. Gerstgraser 2000, Johannsen & Burmeister 2008, Stowasser 2011). In der Regel wird hierbei vereinfachend die Sohlenschubspannung oder mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne herangezogen (Gerstgraser 2000), was sich insbesondere in geraden Strecken in der Praxis bewährt hat (Stowasser 2011). An Prallufern muss dagegen die vereinfacht berechnete Belastung durch den Verstärkungskoeffizienten  $\varepsilon$  (Kapitel 2.2.2.4, Tab. 2.2) nach Schröder & Römisch (2001) erhöht werden, was jedoch für die hiesigen Betrachtungen eines geraden Gerinnes nicht relevant ist. In den Laboruntersuchungen, auf denen der hier vorgestellte Bemessungsansatz basiert, wurde die hydraulische Belastung in Form

der Fließgeschwindigkeit gemessen. Sie dient daher als Eingangsgröße für das weitere Bemessungsverfahren.

## Schritt 2: Abschätzung der Verringerung der hydraulischen Belastung auf die Ufer durch den Einbau von Lenkbuhnen

Nach Durchführung der hydraulischen Berechnungen zur Abschätzung der auf die zu schützenden Ufer wirkenden hydraulischen Belastung in Form der mittleren Fließgeschwindigkeit wird abgeschätzt, wie stark die Fließgeschwindigkeit in Ufernähe durch den Einbau von Lenkbuhnen verringert werden kann.

Die Abschätzung der Verringerung erfolgt für Lenkbuhnen mit einem Inklinationswinkel  $\alpha = 60^\circ$  mit Hilfe des Diagramms in Abb. 6.19, für  $\alpha = 30^\circ$  mit dem Diagramm in Abb. A11 (siehe Anhang 6). Die Eingangsdaten ergeben sich aus den in Kapitel 7.1 erläuterten Grundsätzen.

**Beispiel:** In einem geradlinigen Flussabschnitt mit einer Sohlenbreite von 18 m beträgt die Fließgeschwindigkeit in Ufernähe im Bemessungsfall (z.B.  $HQ_{100}$ )  $\bar{u}_b = 4.0$  m/s und die Fließtiefe  $h = 2.5$  m. Basierend auf den Grundsätzen (Kapitel 7.1) wird gewählt:  $H = 1/10$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $l_p = 1/3 b$ ,  $A_B = 6$ . Damit ergibt sich  $h_B = 0.25$  m,  $l_p = 6.0$  m,  $a_x = 36$  m. Die Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit beträgt etwa 22% (Abb. 7.7). Die für die Bemessung von Ufersicherungen relevante Fließgeschwindigkeit sinkt somit von  $\bar{u}_b = 4.0$  m/s auf 3.1 m/s.

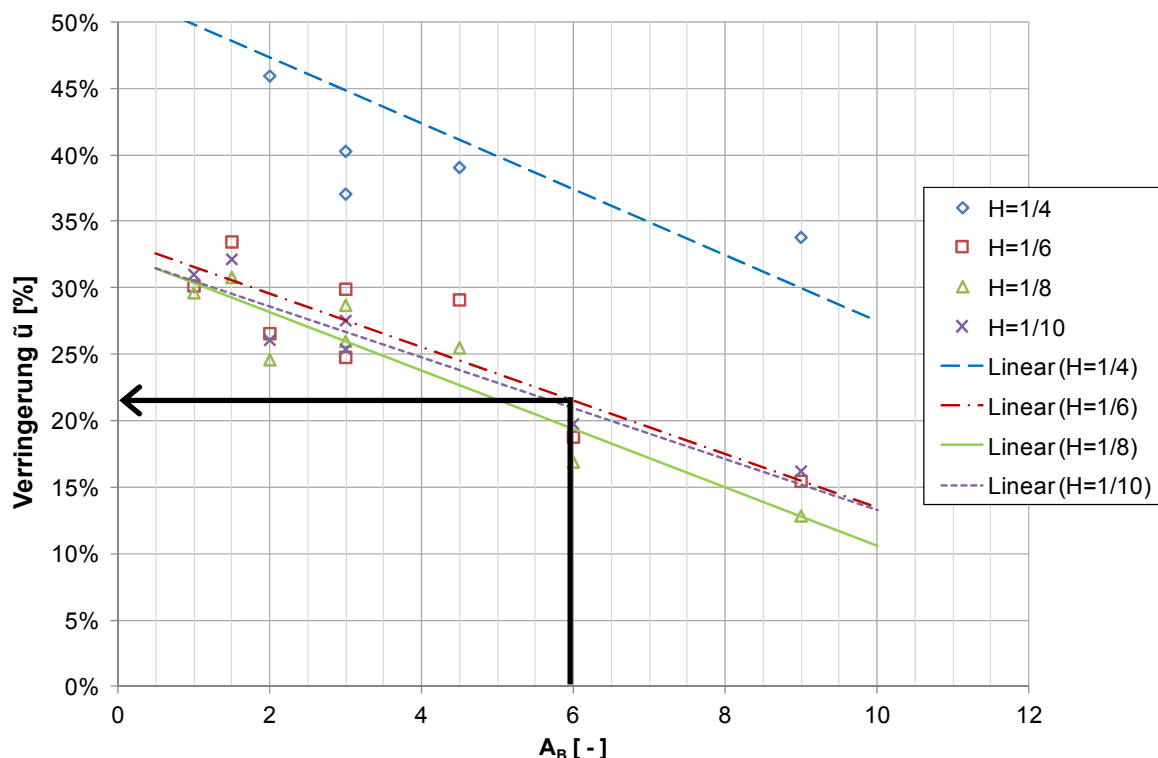


Abb. 7.7: Abschätzung der Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit (Beispiel:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $H = 1/10$ ,  $A_B = 6$ )

Bei der Abschätzung der ufernahen Geschwindigkeitsverringern ist zu berücksichtigen, dass die den Diagrammen zugrunde liegenden Laboruntersuchungen bei fester Sohle durchgeführt wurden. Im Gegensatz dazu weisen die meisten Fließgewässer eine bewegli-

che Sohle auf. Zwischen den Lenkbuhnenköpfen ist daher in der Praxis mit Eintiefungen von wenigen Dezimetern zu rechnen (Kapitel 7.1.2). Es resultiert daraus eine Abflusskonzentration in der Gerinnemitte, durch die die Ufer zusätzlich entlastet werden. Die Verwendung der Diagramme zur Abschätzung der hydraulischen Belastung nach Einbau der Lenkbuhnen beinhaltet daher eine zusätzliche Sicherheit.

### **Schritt 3: Stabilitätsnachweis der Uferböschung, bedarfsweise Auswahl einer ingenieurb biologischen Sicherung**

Die durch die Lenkbuhnen verringerte hydraulische Belastung wird nun in Beziehung zur hydraulischen Belastbarkeit von im Uferbereich vorhandenen Böden und Substraten bzw. potentiell verwendeten Lebendbauweisen gesetzt.

Die im Beispiel berechnete hydraulische Belastung durch  $\bar{u}_b = 3.1 \text{ m/s}$  überschreitet die Belastbarkeit natürlich anstehender Substrate an Ufern (Johannsen & Burmeister 2008). Es bedarf daher neben den Lenkbuhnen einer zusätzlichen Sicherung, die möglichst kostengünstig und naturnah sein sollte. Sofern eine Erhöhung der Uferrauheit und der damit verbundene Wasserspiegelanstieg akzeptiert werden kann, sollte eine ingenieurb biologische Sicherung gewählt werden.

Eine Auswahl geeigneter Sicherungen soll beispielhaft anhand der in Tab. 7.1 zusammengestellten Belastbarkeiten ingenieurb biologischer Bauweisen erläutert werden. Umfangreichere Zusammenstellungen finden sich unter anderem in Johannsen & Burmeister (2008) und Stowasser (2011). Es wird deutlich, dass die im Beispiel erzielte Verringerung der Belastung von 4.0 auf 3.1 m/s die Verwendung zahlreicher Lebendbauweisen (z.B. Flechtzaun, Weidenfaschine, Faschinenwand, Weidenstreckhölzer, Grassoden) ermöglicht. Ohne Lenkbuhnen wäre höchstens eine Faschinenwand in Betracht gekommen, die jedoch bei 4 m/s bereits an die Grenze ihrer Belastbarkeit stößt. Aus diesem Grunde wäre in der Praxis vermutlich ein harter Längsverbau zur Ufersicherung verwendet worden.

Für Lenkbuhnen in geraden Strecken wird, wie auch im Beispiel gewählt, ein relativer Abstand von max.  $A_B = 6$  empfohlen (Kapitel 7.1.3). Für den Fall, dass die Fließgeschwindigkeit die Belastbarkeiten selbst von besonders belastbaren Lebendbauweisen wie Faschinenwänden (vgl. Tab. 7.1) überschreitet, sollte ein kleinerer relativer Abstand  $A_B$  in Betracht gezogen werden, um die ufernahe Fließgeschwindigkeit noch stärker zu verringern.

Unter der Annahme, dass Lenkbuhnen die ufernahe Fließgeschwindigkeit um maximal 30% reduzieren (Abb. 7.7) und ingenieurb biologische Bauweisen bis zu einer Fließgeschwindigkeit von 4.0 m/s verwendet werden können, ermöglichen die Lenkbuhnen die Verwendung von Lebendverbau auch in Bereichen, in denen ohne sie ufernahe Geschwindigkeiten von bis zu 5.7 m/s auftreten. Das Einsatzgebiet ingenieurb biologischer Bauweisen wird durch die Kombination mit Lenkbuhnen folglich stark vergrößert.



Tab. 7.1: Belastbarkeiten ingenieurbioologischer Bauweisen (Gerstgraser 2004, modifiziert)

	<b>Bauweise</b>	<b>Autor</b>	<b><math>\tau</math> [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>u [m/s]</b>
1	Weidenspreitlage	FLORINETH (1982)	195 - 218	----
2	Weidenspreitlage	FLORINETH (1995)	309*	----
3	Flechtzaun	STEIGER (1918)	50	----
4	Flechtzaun	GERSTGRASER (1998b)	100 - 120	3,2 - 3,5
5	Totfaschine	LFU (1996)	70 - 100	2,5 - 3,0
6	Weidenfaschine	LFU (1996)	100 - 150	3,0 - 3,5
7	Weidenfaschine	GERSTGRASER (1998b)	150 - 200	3,3 - 3,8
8	Faschinenwand	GERSTGRASER (1998b)	180 - 240	3,5 - 4,0
9	Faschinen auf Buschlagen	GERSTGRASER (1998b)	120 - 150**	2,0 - 2,5*
10	Geotextilpackungen auf Buschlagen	GERSTGRASER (1998b)	120 - 160**	3,0 - 3,5*
11	Geotextil mit Steckhölzern	GERSTGRASER (1998b)	80 - 120**	2,2 - 2,8*
12	Weidensteckhölzer	WITZIG (1970)	165	----
13	Weidensteckhölzer	LFU (1996)	100 - 150	3,0 - 3,5
14	Weidengebüsch	WITZIG (1970)	100	----
15	Wurzelstockreihen	GERSTGRASER (1998b)	50 - 80**	1,5 - 2,0*
16	Rasen	WITZIG (1970)	50 - (100)	----
17	Grassaat	LFU (1996)	40	1,8
18	Grassoden	LFU (1996)	>60	>3,5

(Bauweisen durch Hochwasser \* beschädigt bzw. \*\* zerstört)

## 7.4 Prallufer

### 7.4.1 Zielsetzung und grundsätzliche Überlegungen

Der Einbau von Lenkbuhnen zum Uferschutz verfolgt das Ziel, die hydraulische Belastung durch die Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit zu reduzieren. Beim Einbau an einem Prallufer sollen sie darüber hinaus die Ausbildung eines tiefen ufernahen Kurvenkolks verhindern, der die Standsicherheit des Ufers durch das Unterspülen des Böschungsfußes zusätzlich zur hydraulischen Belastung herabsetzt.

Da der Kurvenkolk infolge der kurveninduzierten Sekundärströmung und der mit ihr verbundenen Änderungen der Geschwindigkeitsverteilung entsteht, kann seine Ausbildung durch die Induzierung einer mindestens gleich starken Sekundärströmung umgekehrter Drehrichtung mit Hilfe von Lenkbuhnen bzw. Leitelementen verhindert werden. Bestehende Kolke werden dann nach Einbau von Lenkbuhnen eigendynamisch verfüllt.

Odgaard & Wang (1991) formulierten daher als Bemessungsziel des Einsatzes von Leitelementen in Flusskurven ein Kräftegleichgewicht zwischen der krümmungsinduzierten und der leitelementinduzierten Sekundärströmung (Kapitel 4.2). Aufgrund der ähnlichen Wirkungsweise wird dieses Bemessungsziel auch für Lenkbuhnen verfolgt.

Um die Ausbildung eines ufernahen Kurvenkolks zu vermeiden, werden Lenkbuhnen daher so bemessen, dass die lenkbuhneninduzierte Sekundärströmung nahe der Buhnenwurzel mindestens bis zum Bemessungsabfluss (i.d.R.  $HQ_{100}$ ) größer als die kurveninduzierte ist. Da die lenkbuhneninduzierte Sekundärströmung von der Wurzel zum Kopf auf null abnimmt (Kapitel 6.1.1.2), bildet sich im kopfnahen Bereich der Lenkbuhne wieder die kurveninduzierte Sekundärströmung aus (Abb. 7.8). Die hydraulische Belastung der Lenkbuhne ist daher am Kopf besonders groß. Der Talweg bildet sich entlang der Buhnenköpfe aus, er wird durch die Lenkbuhnen also vom Prallufer in Richtung Innenufer verschoben (s.a. Abb. 6.13 rechts), wodurch ein Unterspülen des Böschungsfußes verhindert wird.

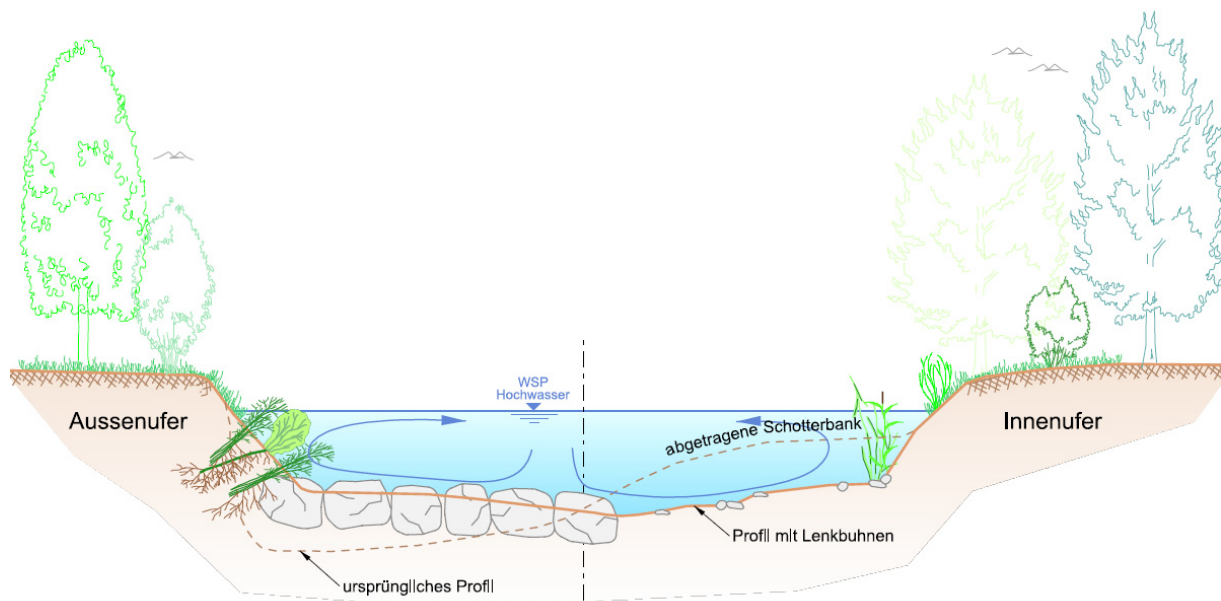


Abb. 7.8: Schematische Darstellung der Sekundärströmungen in einer Flusskrümmung mit inklinanten Lenkbuhnen (nach Grober 1998, modifiziert)

Durch das Verfüllen des Kurvenkolks und die damit verbundene Verringerung der Fließtiefe ermöglichen Lenkbuhnen auch den vermehrten Einsatz ingenieurbilogischer Bauweisen entlang von Prallufern, an denen ihre Einsatzmöglichkeiten ansonsten stark eingeschränkt sind (Kapitel 3.6.2.1). Ihre Verwendung kommt hier nur in Kombination mit wasserbautechnischen Fußsicherungen (z.B. Steinschüttung) in Betracht. Dies resultiert aus der selbst bei Bäumen nur bis in eine Tiefe von etwa ein bis zwei Meter reichende „armierende Wirkung der Wurzeln“ (Oplatka 1998). Auch Weiden und Erlen, die in der Regel wenige Dezimeter oberhalb der Sommermittelwasserlinie angepflanzt werden (Schröder & Römisch 2001) und auch unterhalb der Wasseroberfläche wurzeln, können ein Prallufer daher nur bis zu einer Wassertiefe (Abstand Sohle – Mittelwasserlinie) von etwa einem Meter bis maximal 1.5 m sichern. Durch die Verringerung der Kurvenkolktiefe mit Lenkbuhnen kann damit der Einsatzbereich ingenieurbilogischer Sicherungen ohne „tote“ Fußsicherung deutlich ausgeweitet werden.

### 7.4.2 Bemessung

Wie bereits erläutert, soll die kurveninduzierte Sekundärströmung neutralisiert werden. Zu ihrer analytischen Beschreibung wurden verschiedene Verfahren entwickelt, von denen das Verfahren aus dem Standardwerk zur Kurvenströmung von Rozovskii (1957) das gebräuchlichste ist (Kapitel 2.3.3). In dem Verfahren wird eine lineare Verteilung der Quergeschwindigkeit über die Tiefe angenommen. Die Quergeschwindigkeit ist folglich an der Wasseroberfläche und an der Sohle gleich groß, die Fließrichtung jedoch umgekehrt (Gl. 2.16, S. 15).

Zur analytischen Beschreibung der durch Lenkbuhnen hervorgerufenen Quergeschwindigkeit wurde für jede Versuchsanordnung eine ebenfalls lineare Verteilung abgeleitet, deren Drehimpuls dem der gemessenen Quergeschwindigkeitsverteilung entsprach (Kapitel 6.2.1).

Relative Quergeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche, die nach Rozoskii (1957) berechnet werden, sind also unmittelbar vergleichbar mit den lenkbuhneninduzierten, die in Abb. 6.16 und Abb. 6.17 in Abhängigkeit von  $A_B$  und  $H$  dargestellt sind. Bei gleicher Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche tritt daher der gleiche Drehimpuls auf. Da aus der Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche direkt auf die Quergeschwindigkeit an der Sohle und den Drehimpuls geschlossen werden kann, ist es ausreichend, nur die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche zu betrachten. Ist die lenkbuhneninduzierte Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche bei entgegengesetzter Fließrichtung größer als die kurveninduzierte, überwiegt auch der lenkbuhneninduzierte Drehimpuls. Die kurveninduzierte Sekundärströmung wird vollständig eliminiert, es überwiegt die durch die Lenkbuhnen hervorgerufene Sekundärströmung.

Um die Verhinderung eines Kurvenkolks und damit die Stabilität des Prallufers mindestens bis zum Bemessungsabfluss zu gewährleisten, muss die Lenkbuhnenordnung und -geometrie so gewählt werden, dass die buhneninduzierte Querströmung nahe des Prallufers größer als die kurveninduzierte ist.

Zur Bemessung der Lenkbuhnen sind somit folgende Schritte notwendig:

**Schritt 1: Berechnung der relativen kurveninduzierten Quergeschwindigkeit**

$$c_{\text{Kurve}} = v_s / u_m \text{ (Gl. 6.1)}$$

**Schritt 2: Ermittlung des maximalen relativen Lenkbuhnenabstands  $A_B$  und der relativen Höhe  $H$  mit Abb. 6.16 und Abb. 6.17, so dass gilt  $c_{\text{Lenkbuhne}} > c_{\text{Kurve}}$**

**Schritt 3: Festlegung einer Lenkbuhnenanordnung und -geometrie für das ermittelte  $A_B$  und  $H$  unter Einhaltung der in Kapitel 7.1 beschriebenen Grundsätze**

Für die Bemessung der Lenkbuhnen in Flusskurven müssen folglich nur der Krümmungsradius und die Fließtiefe im Talweg der zu schützenden Kurve bekannt sein. Außerdem sollte die Rauheit (z.B. in Form des Darcy-Weisbach-Widerstandsbeiwert  $\lambda$ ) bekannt sein, um den Sekundärströmungskoeffizienten  $\alpha_v$  (Gl. 2.24, S. 16) genau zu berechnen. Da der Wertebereich von  $\alpha_v$  jedoch mit 6.3 bis 6.7 (Malcherek 1999) klein ist, kann eine ausreichend genaue Bemessung i.d.R. bereits unter Verwendung des Mittelwerts 6.5 erzielt werden (Kapitel 2.3.3).

Das entwickelte Verfahren ist damit einfach anwendbar und sehr praxisnah. Da das Verfahren von Rozovskii (1957) von einer voll entwickelten Sekundärströmung ausgeht, die in der Natur nur in sehr langen Kurven auftritt, wird die kurveninduzierte Sekundärströmung eher überschätzt. Hieraus resultiert eine zusätzliche Sicherheit.

### 7.4.3 Bemessungsbeispiel

Zum Schutz eines Prallufers eines großen Talflusses (Sohlenbreite  $b_{So} = 60$  m) mit engem Radius und großen Hochwasserspitzen sollen Lenkbuhnen eingebaut werden. Der Kurvenradius entlang des Talwegs beträgt  $r_T = 260$  m, die mittlere Fließtiefe im Bemessungsfall ist  $h_b = 5.0$  m.

#### Schritt 1: Berechnung der relativen kurveninduzierten Quergeschwindigkeit $c_{Kurve}$

Die Berechnung von  $c_{Kurve}$  erfolgt unter der Annahme  $\alpha_v = 6.5$ . Alternativ kann der Sekundärströmungskoeffizient auch berechnet werden, wenn die Rauheit des Gewässers bekannt ist (Kapitel 2.3.3). Die für die relative Quergeschwindigkeit relevanten Größen sind der Kurvenradius und die Fließtiefe im Bemessungsfall:

$$c_{Kurve} = \frac{v_s}{u_m} = \alpha_v \cdot \frac{h_b}{r_T} = 6.5 \cdot \frac{5.0}{260} = 0.125$$

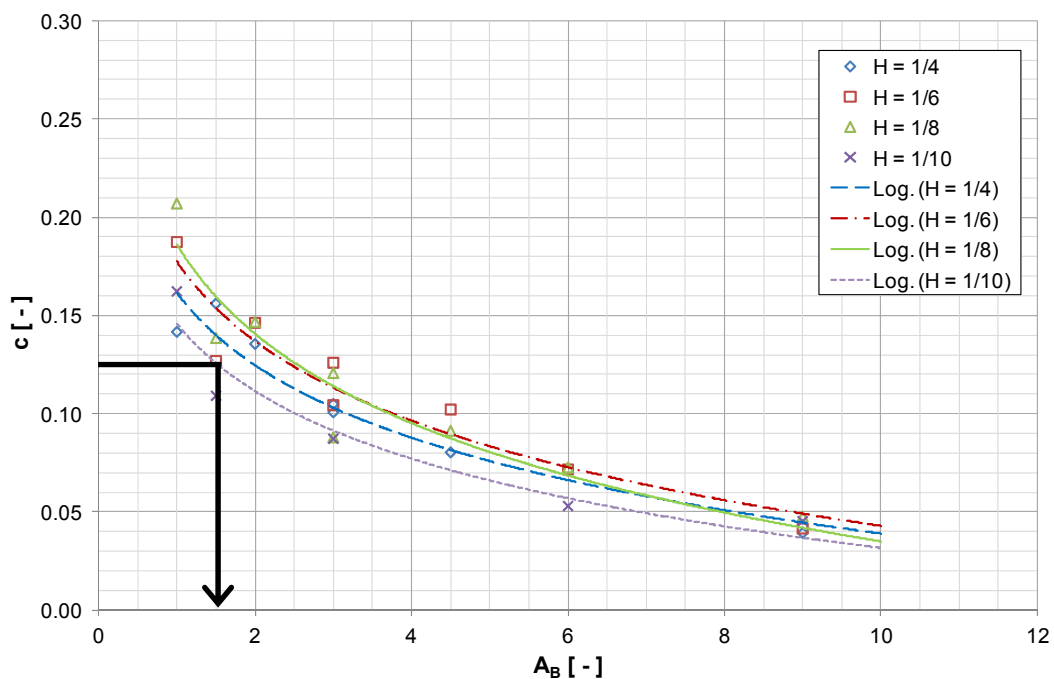


Abb. 7.9: Ermittlung des maximalen relativen Abstands ( $\alpha = 60^\circ$ )

**Schritt 2: Ermittlung des maximalen relativen Lenkbuhnenabstand  $A_B$  und der relativen Höhe  $H$ , so dass nahe des Prallufers gilt  $c_{\text{Lenkbuhne}} > c_{\text{Kurve}}$**

Die in Schritt 1 berechnete relative kurveninduzierte Quergeschwindigkeit  $c_{\text{Kurve}}$  dient als Eingangswert für die Bemessung (Abb. 7.9). Soweit möglich wird ein Inklinationswinkel  $\alpha = 60^\circ$  verwendet (Kapitel 7.1.4). Aus Abb. 7.9 wird deutlich, dass zur Neutralisierung der Sekundärströmung in Prallufernähe ein relativer Abstand von  $A_B = 1.5$  bei  $H = 1/10$  notwendig ist.

**Schritt 3: Festlegung einer Lenkbuhnenanordnung und -geometrie für das ermittelte  $A_B$  und  $H$  unter Einhaltung der beschriebenen Grundsätze**

Unter Einhaltung des Drittelprinzips ergibt sich bei der Sohlenbreite von 60 m eine Lenkbuhnenlänge  $l_p = 40$  m. Der Abstand zwischen den Lenkbuhnen ist

$$a_x = A_B \cdot l_p = 60 \text{ m.}$$

Die Höhe der Lenkbuhne über der ausgeglichenen Sohlenlage (Abb. 7.2) beträgt:

$$h_B = h_b \cdot H = 5.0 \cdot \frac{1}{10} = 0.5 \text{ m.}$$

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Bereits Anfang der 1990er Jahre entwickelte die Baubezirksleitung Bruck an der Mur / Steiermark mit der Lenkbuhne eine besonders naturnahe und kostengünstige Uferschutzbauweise. Wesentliches Kennzeichen ist ihre geringe Höhe, weshalb sie bereits bei Niedrigwasserabflüssen vollständig überströmt wird und zu keinem nennenswerten Wasserspiegelanstieg führt (Mende 2012). Lenkbuhnen werden in der Gebirgsregion Steiermark aus unbehauenen Blocksteinen gebaut, ihr Umfeld ist daher durch eine große Strömungsvielfalt gekennzeichnet, die mit Substratfraktionierungen und Tiefenvarianz einhergeht. Durch die Verwendung von Blocksteinen sind sie auch für Gewässer mit großer hydraulischer Belastung geeignet.

Die uferschützende Wirkung der Lenkbuhnen basiert auf der Induzierung großräumiger Sekundärströmungen, die mit der Hauptströmung interagieren und so die Geschwindigkeitsverteilung und den Geschiebetransport beeinflussen (Sindelar & Mende 2009). Die Lenkbuhne ist damit dem Instream River Training (IRT) zuzuordnen (Mende & Sindelar 2011, Mende 2012). Trotz mehr als zwanzigjähriger Erfahrung bei der Baubezirksleitung und guter Wirkung hinsichtlich des Uferschutzes wurde die Lenkbuhne bisher nicht wissenschaftlich untersucht. Folglich wurden keine wissenschaftlich fundierten Bemessungsansätze entwickelt, unter deren Anwendung die Funktion der Lenkbuhnen gewährleistet werden kann. Die Bauweise wird daher außerhalb der Steiermark nur zurückhaltend verwendet. Das Fehlen wissenschaftlich basierter Bemessungsansätze steht damit einer weiten Verbreitung der naturnahen und kostengünstigen Lenkbuhnen entgegen, die durch ihre belastungsreduzierende Wirkung auch eine vermehrte Anwendung ingenieurbioologischer Bauweisen ermöglichen. Als zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit sollten daher Bemessungsansätze für einen Uferschutz mit Lenkbuhnen in geraden Gewässerstrecken und Prallufern entwickelt werden.

Die Induzierung der Sekundärströmungen erfolgt, wie Gehrig (1958) und Tan et al. (2006) an ähnlichen Bauweisen nachweisen konnten, durch die Ausbildung einer Grundwalze, die wie eine Förderschnecke wirkt. In ihr wird bei inklinanter Anordnung Wasser und Geschiebe zur Bühnenwurzel transportiert, sie erzeugt also eine Querströmung, die die Entwicklung einer Sekundärströmung einleitet.

Eine rein technische Bauweise des IRT, die in der Regel aus naturfernen Materialien wie Beton oder Spundwandelementen erstellt wird, sind die Leitelemente (engl. *Iowa Vanes*, *Submerged Vanes*). Leitelemente wurden am Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) systematisch untersucht. Die Anordnung und konstruktive Gestaltung wurde optimiert, ein theoretisches Modell entwickelt und darauf aufbauend ein Bemessungsverfahren hergeleitet. Leitelemente wurden in zahlreichen Labor- und Naturversuchen erfolgreich zum Uferschutz in Geraden und Krümmungen eingesetzt.

Die Leitelementtheorie basiert auf der Annahme, dass die Sekundärströmungsinduzierung durch dieselben Prozesse hervorgerufen wird wie die Randwirbelbildung am seitlichen Ende eines Tragflügels mit großem Seitenverhältnis (z.B. dem Flügel eines Segelflugzeugs). Es gilt somit die lineare Tragflächentheorie, wonach der Auftriebsbeiwert des Flügels  $c_L$  linear mit dem Anstell- bzw. Inklinationswinkel ansteigt. Voraussetzung für die Bildung des Rand-

wirbels ist eine am Flügel anliegende Strömung. Das Leitelement wird als Tragflügel aufgefasst, der um  $90^\circ$  um die Längsachse gedreht in der Gewässersohle befestigt wird.

Der beschriebene Mechanismus der Sekundärströmungsinduzierung kann nur für Leitelemente mit kleinen Inklinationswinkeln  $\alpha$  und großen Höhen-Längen-Verhältnissen  $\Lambda$  angenommen werden. Das IIHR empfiehlt daher, die Geometrie und Anordnung der Leitelemente in einer nur sehr kleinen Bandbreite zu variieren (z.B.  $\alpha = 15 \div 30^\circ$ ,  $\Lambda = 0.3 \div 0.5$ , Odgaard 2009).

Wissenschaftliche Untersuchungen, die außerhalb des IIHR durchgeführt wurden, zeigen, dass die Leitelementtheorie stark von Messungen abweichende Berechnungsergebnisse liefert, wenn die Anordnung und Geometrie der Elemente von den engen Vorgaben abweicht (z.B. Marelius & Sinha 1998; Flokstra et al. 1998; Gupta et al. 2006). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Sekundärströmungsinduzierung bei Abweichung von den Vorgaben nicht mehr nach der Tragflächentheorie erfolgt. Da auch die Anordnung und Geometrie von Lenkbuhnen sehr stark von den Empfehlungen des IIHR abweicht, kann mit Sicherheit darauf geschlossen werden, dass die Leitelementtheorie nicht auf sie übertragbar ist.

Die zu erarbeitenden Bemessungsansätze für Lenkbuhnen mussten daher losgelöst von der Leitelementtheorie entwickelt werden. Voraussetzung für die Entwicklung der Ansätze ist ein verbessertes Prozessverständnis, dass in Laboruntersuchungen entwickelt wurde. Aufgrund des großen Wissensdefizits zu Lenkbuhnen waren noch wesentliche Grundlagen zu erarbeiten. Es erfolgte daher eine Beschränkung auf relativ wenige Einflussparameter und Messgrößen. Die Untersuchungen wurden in einem geraden Laborgerinne mit fester Sohle durchgeführt. Die Lenkbuhnen wurden einseitig angeordnet und die Anordnung und Geometrie in einer weiten Bandbreite variiert (z.B.  $\alpha = 30, 60^\circ$  und  $90^\circ$ , Verhältnis Buhnenhöhe zu Fließtiefe  $H = 1/10 \div 1/4$ ). Der Fokus lag auf der Erfassung des Strömungsbildes. Aus diesem Grund wurden vor allem mehrdimensionale Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt.

Die Auswertung der Messungen zeigte, dass alle inklinanten, also vom Ufer gegen die Strömungsrichtung verlaufenden Lenkbuhnen ( $\alpha = 30^\circ$  und  $60^\circ$ ) Sekundärströmungen induzieren. Senkrecht zum Ufer angeordnete Buhnen ( $\alpha = 90^\circ$ ) riefen dagegen keine Sekundärströmung hervor. Der Verlauf des Drehimpulses der Sekundärströmung über die Rinnenbreite wurde anhand der gemessenen Quergeschwindigkeiten für jede der insgesamt 108 Versuchsanordnungen berechnet. Wie die Auswertung zeigte, induzieren Lenkbuhnen nahe der Buhnenwurzel, also am zu schützenden Ufer, den stärksten Drehimpuls. Von dort nimmt er annähernd linear zum Kopf hin bis auf null ab.

Mit den Messungen konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass die induzierte Sekundärströmung zu einer Änderung der Geschwindigkeitsverteilung führt. Je nach Anordnung und Geometrie konnte die tiefengemittelte ufernahe Geschwindigkeit um über 30% verringert werden. Außerhalb des Lenkbuhnenbereichs und am Buhnenkopf nahm die Geschwindigkeit um maximal 10% zu. Da die Fließgeschwindigkeit in die auf ein Uferelement wirkenden Lift- und Scherkräfte zum Quadrat einfließt, ist mit der genannten Verringerung eine Halbierung der Uferbelastung verbunden.

Zur analytischen Beschreibung des Einflusses der Lenkbuhnenanordnung und -geometrie auf die induzierte Sekundärströmung wurde für jede Parameterkombination die relative



Quergeschwindigkeit  $c$  berechnet. Sie beschreibt das Verhältnis von Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche zur mittleren Fließgeschwindigkeit und wurde unter der Annahme einer linearen Quergeschwindigkeitsverteilung über die Tiefe aus den über die Messdaten ermittelten Drehimpulsen berechnet. Aus der relativen Quergeschwindigkeit kann damit direkt auf den Drehimpuls als Maß für die Stärke der Sekundärströmung geschlossen werden.

Die analytische Auswertung zeigte, dass ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$ , dem Verhältnis vom Buhnenabstand in Fließrichtung  $a_x$  zur auf die Gewässerbreite projizierten Buhnenlänge  $l_p$ , besteht. Die induzierte relative Querströmung  $c$  erreichte je nach Anordnung und Geometrie nahe der Buhnenwurzeln Werte von  $c > 0.2$ . In Flusskrümmungen, in denen die Quergeschwindigkeit krümmungsinduziert ist, erreicht dieses Verhältnis auch bei großen Abflüssen selten Werte von mehr als 0.1. Hieraus kann geschlossen werden, dass mit Lenkbuhnen die krümmungsinduzierte Sekundärströmung in der Nähe des zu schützenden Ufers auch bei starken Prallufersituationen neutralisiert werden kann und der Kurvenkolk somit vom Ufer „weggeschoben“ wird. Eine wichtige Erkenntnis ist darüber hinaus, dass die Größe der induzierten Sekundärströmung in dem untersuchten Bereich kaum von der relativen Höhe  $H$ , dem Verhältnis von mittlerer Lenkbuhnenhöhe  $h_{B,m}$  zur mittleren Fließtiefe  $h_m$ , abhängt. Auch sehr niedrige Lenkbuhnen mit  $H = 1/10$  rufen bereits starke Sekundärströmungen hervor. Tendenziell rufen Lenkbuhnen mit  $\alpha = 30^\circ$  bei gleichem relativen Abstand  $A_B$  etwas stärkere Sekundärströmungen als bei  $60^\circ$  hervor.

Hinsichtlich der Änderung der Geschwindigkeitsverteilung über die Gerinnebreite zeigte die analytische Auswertung, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem relativen Abstand  $A_B$  und der Verringerung der ufernahen Geschwindigkeit besteht. Die Verringerung hängt, ebenso wie die Stärke der induzierten Sekundärströmung, nur wenig von der relativen Höhe  $H$  ab. So konnte die Geschwindigkeit entlang der Buhnenwurzeln selbst bei  $H = 1/10$  noch um bis zu 30% reduziert werden.

Überraschenderweise war die Verringerung der ufernahen Geschwindigkeit bei  $\alpha = 30^\circ$  trotz stärkerer induzierter Sekundärströmung etwas kleiner als bei  $60^\circ$ . Als mögliche Ursache wird die bei  $60^\circ$  etwas größere Rauheitswirkung der Lenkbuhnen gesehen, die sich auch in einem geringfügig höheren Wasserspiegelanstieg zeigte. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass der Anstieg der Fließtiefe in den Laboruntersuchungen bei in der Praxis üblichen Anordnungen bei maximal 6% lag. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit einer festen Sohle gearbeitet wurde. Bei beweglicher Sohle ist außerhalb der Lenkbuhnen mit Eintiefungen zu rechnen, so dass der Anstieg in der Natur im Regelfall noch niedriger ist und Lenkbuhnen daher als annähernd wasserstandsneutral bezeichnet werden können.

Aufbauend auf der analytischen Beschreibung wurde ein Bemessungsansatz zum Uferschutz in geraden Gewässerstrecken und an Prallufeln entwickelt. In geraden Gewässerabschnitten soll die ufernahe Geschwindigkeit durch den Lenkbuhneneinbau so stark verringert werden, dass auf eine zusätzliche Ufersicherung verzichtet oder statt eines harten Verbaus eine naturnahe ingenieurbologische Sicherung verwendet werden kann. Mit Hilfe der entwickelten Diagramme kann die durch eine Lenkbuhnenanordnung hervorgerufene Verringerung der ufernahen Fließgeschwindigkeit abgeschätzt werden. Überschreitet die Fließgeschwindigkeit trotz Lenkbuhnen die Belastbarkeit des anstehenden Ufermaterials, wird eine

geeignete ingenieurbioologische Sicherung ausgewählt. Wichtigstes Auswahlkriterium ist die hydraulische Belastbarkeit der Bauweise, die z.B. Gerstgraser (2004) und Stowasser (2011) entnommen werden kann.

Durch den Einbau von Lenkbuhnen in Prallufern soll ebenfalls auf eine zusätzliche harte Sicherung zugunsten ingenieurbioologischer Methoden verzichtet werden. Die Lenkbuhnen werden unter Verwendung der entwickelten Diagramme so dimensioniert, dass die buhneninduzierte Sekundärströmung, ausgedrückt durch die relative Quergeschwindigkeit  $c$ , nahe des Prallufers bis zum Bemessungsabfluss größer als die krümmungsinduzierte ist. Die krümmungsinduzierte relative Quergeschwindigkeit wird über das einfach handhabbare Verfahren von Rozovskii (1957) abgeschätzt. Da die buhneninduzierte Sekundärströmung größer als die kurveninduzierte ist, werden die Ausbildung eines ufergefährdenden Kurvenkolks verhindert, der Talweg in Richtung Gewässermitte verschoben und die Fließtiefe am Prallufer so weit reduziert, dass hier vermehrt ingenieurbioologische Bauweisen auch ohne zusätzliche tote Fußsicherungen (z.B. Steinschüttung) eingebaut werden können.

Mit der vorliegenden Arbeit konnten das Prozessverständnis zu Lenkbuhnen entwickelt und die relevanten dimensionslosen Parameter bestimmt werden, die ihre uferschützende Wirkung beeinflussen. Die darauf aufbauenden Bemessungsverfahren für Lenkbuhnen in Geraden und an Prallufern sind praxisnah und können in einem weiten Anwendungsgebiet genutzt werden. Sie sind jedoch auf Inklinationswinkel von  $30^\circ$  und  $60^\circ$  beschränkt, weshalb in der zukünftigen Lenkbuhnenforschung insbesondere der Einfluss des Inklinationswinkels auf das bewirkte Strömungsbild weiter untersucht werden sollte.

Darüber hinaus wird grundsätzlich weiterer Forschungsbedarf zur Optimierung der Lenkbuhnengeometrie gesehen. Vermutlich kann die Wirkung der Lenkbuhnen z.B. durch Anpassungen der Buhnenneigung längs und quer zur Fließrichtung oder auch der Linienführung (z.B. sichelförmig statt gerade) weiter verbessert werden. Gleiches gilt für die Anordnung der Blocksteine, die nicht zwangsläufig geschlossen, sondern auch auf Lücke gesetzt werden. Darüber hinaus sollten vermehrt Bautypen für Naturräume entwickelt werden, in denen Blocksteine nicht leitbildkonform sind. Ebenso wäre die Entwicklung von Bautypen für große Fließgewässer wie z.B. Rhein und Elbe wünschenswert.

Neben der Optimierung der Geometrie sollte der Fokus der Forschung auch auf Untersuchungen in Krümmungen liegen. Der vorgestellte Bemessungsansatz für Kurven wurde aus Messungen in einem geraden Gerinne abgeleitet. Dieses Vorgehen ist gerechtfertigt, da der Ansatz von Rozovskii (1957) für vollentwickelte Sekundärströmungen gilt, die in der Natur nur bei sehr langen Kurven auftreten. Die krümmungsinduzierte Sekundärströmung wird daher in der Regel überschätzt, woraus eine zusätzliche Sicherheit resultiert. Es wird daher vermutet, dass hinsichtlich der Anordnung und Geometrie von Lenkbuhnen an Prallufern noch ein gewisses Optimierungspotential besteht, auch hinsichtlich der genauen Lage der ersten Lenkbuhne. Versuche in Krümmungen sollten bei beweglicher Sohle durchgeführt werden, um auch die sedimentologischen Prozesse wie die Verlandung des Kurvenkolks untersuchen zu können. Darüber hinaus kann aus den Versuchen eine abschließende Aussage zum Einfluss von Lenkbuhnen auf den Wasserstand bei beweglicher Sohle abgeleitet werden. Das Thema Lenkbuhnen, das in der vorliegenden Arbeit erstmals umfassend aufbe-

reitet wurde, bietet folglich auch zukünftig noch ein großes Betätigungsfeld für die wissenschaftliche Forschung.

## 9 Literatur

Abad, J. D.; Rhoads, B. L.; Güneralp, I.; Garcia, M. H. (2008): Flow Structure at Different Stages in a Meander-Bend with Bendway Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 8, pp. 1052 - 1063

Alvarez, J. A. M. (1989): Design of Groins and Spur Dikes. State-of-the-Art Report: Mexico, pp- 296 - 301 Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering, New Orleans, La., 14–18 August 1989. ASCE, pp. 296 - 301

ASCE (1965) Channel Stabilization of Alluvial Rivers: Progress Report by the Task Committee on Channel Stabilization Works, Committee on Regulation and Stabilization of Rivers. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, Vol. 91, No. 1, February 1965, pp. 7 - 36

Aya, S.; Fujita, I.; Miyawaki, N. (1997): 2-D Models for flows in river with submerged groins. Proceedings of the 27th IAHR Congress, San Francisco, USA, pp. 829 - 837.

Barkdoll, B.D.; Ettema, R.; Odgaard, A.J. (1999): Sediment Control at Lateral Diversions: Limits and Enhancements to Vane Use. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 8, pp. 862 - 870

Bathurst, J.C.; Thorne, C.R.; Hey, R.D. (1979). Secondary Flow and Shear Stress at River Bends. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 105, No. HY10, pp. 1277 - 1295

Bertin, J. J.; Smith, M. L. (1979): *Aerodynamics for engineers*. 1st edition, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall

Bethge, K. (1989): *Schülerduden Die Physik: ein Sachlexikon für die Schule*. Herausgegeben und bearbeitet von Meyers Lexikonredaktion unter Leitung von K.-L. Ahlheim; 2. vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage; Dudenverlag Mannheim, Wien, Zürich, ISBN 3-411-02219-1

Bollay, W. (1939): A Non-linear Wing Theory and its Application to Rectangular Wings of Small Aspect Ratio. *Zeitschrift für angewandte Mathematische Mechanik*, Bd. 19, Nr. 1, S. 21 - 35

Borosi, G. (2003): *Die Drallströmung in Wirbelkammern*. Dissertation an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik

Buzengeiger, G. (undatiert): *Belange des Wassersports bei Ausbau und Unterhaltung der Gewässer. Sonderdruck zum Thema: Erhaltung und Gestaltung der Landschaft bei Wasserbaumaßnahmen*. Bund der Wasserbau- und Kulturbauingenieure e.V., Lv. Niedersachsen, Bremen und Berlin, S. 62 - 72

Chow, V. T. (1959): *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company

de la Motte (2000): *Tiefenintegrierte Simulation der Wirkung von Sekundärströmungen in morphodynamischen Modellen*. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau, TU Hamburg-Harburg

DIN 19661-2 (2000): *Richtlinien für Wasserbauwerke - Sohlenbauwerke; Teil 2: Abstürze, Absturztreppe, Sohlenrampen, Sohlengleiten, Stützwälle, Grundschrägen, Sohlenschrägen*

DWA (2014): *Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Merkblatt DWA-M509*. Herausgeber und Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef

Engelund, F. (1974): Flow and bed topography in channel bends. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 100, No. 11, pp. 1631 – 1648

- Fitzpatrick, F.A.; Peppler, M.C.; Schwar, H.E.; Hoopes, J.A.; Diebel, M.W. (2004): Monitoring Channel Morphology and Bluff Erosion at Two Installations of Flow-Deflecting Vanes, North Fish Creek, Wisconsin, 2000–03. USGS Scientific Investigations Report 2004–5272
- Flokstra, C.; de Groot, F.; Struiksmä, N. (1998): Optimalisatie lengte bodemschermen. WL, Delfs Hydraulics, Report Q2418 (auf Niederländisch)
- Flokstra, C. (2006): Modelling of submerged vanes. Journal of Hydraulic Research, Vol. 44, No. 5, pp. 591 - 602
- Friedrich, J. (2008): Naturmessungen über die Funktionsweise von Buhnen an der Mürz. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz
- Fukuoka, S. (1989): Groins and vanes developed basing upon a new concept of bank protection. Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering, New Orleans, Louisiana, edited by Michael A. Ports, ASCE, August 14 - 18
- Gehrig, W. (1958): Der Verbau von Übertiefen und die Erhaltung des Fahrwassers. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Mitteilungsblatt Nr. 11, S. 20 - 34
- Gersten, K. (1957): Nichtlineare Tragflächentheorie für Rechteckflügel bei inkompressibler Strömung. Zeitschrift für Flugwissenschaften 5, Nr. 9, S. 276 - 280
- Gersten, K. (1960): Nichtlineare Tragflächentheorie, insbesondere für Tragflügel mit kleinem Seitenverhältnis. Habilitationsschrift, Institut für Strömungsmechanik der TU Braunschweig
- Gerstgraser, C. (2000): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern - Grundlagen zu Bau, Belastbarkeiten und Wirkungsweisen. Dissertationen der Universität für Bodenkultur in Wien, Band 52, Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien
- Gerstgraser, C. (2004): Werte über Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen zur Ufersicherung. Fachtagung: Naturnahe Ufersicherung an Fließgewässern – Stand der Technik am 30.03.2004, Dresden
- Glüh, K. (2005): Abschätzung der Auswirkung von Sohlgrundbuhnen und Strömungstrichter auf Hydraulik, Morphologie und Fischbestand. Studienarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig
- Grober, O. (1998): Ökologisch orientierte Gewässerinstandhaltungen mit naturnaher dynamischer Landschaftseingliederung nach Grundsätzen von V. Schauburger in der Region Mariazell an der Salza und ihren Nebenbächen. Zusammenstellung der Baubezirksleitung Bruck an der Mur
- Guercio, R.; Magini, R.; Rotondi, M. (2004): Use of sheet-piling submerged vanes. River Flow 2004, Proc. of the int. conf. on fluvial hydraulics, pp. 217 - 222
- Gupta, U.P.; Sharma, N.; Ojha, C.S.P. (2006): Performance evaluation of submergence ration of a rectangular submerged vane with a collar. International Journal of Sediment Research, Vol. 21, No. 1, pp. 42 - 49
- Hafner, T. (2008): Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft 117, TU München
- Hagemann, A. (2006): Abschätzung der Auswirkungen einer Wasserschnecke auf Hydraulik, Morphologie und Fischbestand. Studienarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig
- Hansen, U. A. (1985): Wasserbausteine im Deckwerksbau – Bemessung und Konstruktion. Westholsteinische Verlagsgesellschaft Boyens & Co., Heide (Holstein), ISBN 3-8042-0346-9
- IUB Engineering AG (2013): Hochwasserschutz und Auenlandschaft Thurmündung, Umbau Eggrank – Ökologische Aufwertung durch Lenkbuhnen. Technischer Bericht zum Ausführungsprojekt (Entwurf, unveröffentlicht)

- Johannsen, R.; Burmeister, B. (2008): Hydrotechnische Grundlagen der Ingenieurbiologie. Mitteilungen der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V., Nr. 31, S. 2 - 23, Aachen
- Jongeling, T. H. G.; Flokstra, C. (2001): Bodemschermen: Stromingskrachten en snelheidsveld bij variatie van de schermhoogte. Delft Cluster Report (auf Niederländisch)
- Kikkawa, H.; Ikeda, S.; Kitagawa, A. (1976): Flow and Bed Topography in Curved Open Channels. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102, No. HY9, pp. 1327 – 1342
- Koll, K. (2002): Studie zur Durchführung von Geschiebemessungen. Zwischenbericht zum Auftrag „Wissenschaftliche Untersuchungen an Fließgewässern im Dienstbezirk der Gewässerdirektion südl. Oberrhein / Hochrhein Bereich Waldshut-Tiengen“. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Krouzecky, N. (2004): Buhnen – Wasserspiegelanhebung zufolge nicht überströmter Buhnen bei fester Sohle. Institut für Konstruktiven Wasserbau, TU Wien, Verlag Publish Factory Medienproduktion GmbH, ISBN 3-9501761-2-8, Wien
- Lagasse, P.F.; Zevenbergen, L.W.; Schall, J.D.; Clopper, P.E. (2001): Bridge scour and stream instability countermeasures – experience, selection and design guidance. U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, Publication No. FHWA NHI 01-003, Second Edition
- Lengnick, C.; Krauter, G. E. (2005): Pilotuntersuchung Hochwasser-Gefahrenkarte Wiese, Teil: Wasserspiegellagenberechnungen für die Wiese von Lörrach / Staatsgrenze (km 0+057) bis zum Wehr Atzenbach (km 27+134). Erläuterungsbericht, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig, Karlsruhe
- LfU (2000): Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern – Raue Rampen und Verbindungsgewässer. Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg, Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 63, Karlsruhe
- LfU (2002): Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Teil 2 – Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen. Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg, Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 75, Karlsruhe
- Lugt, H.J. (1979): Wirbelströmung in Natur und Technik. Verlag G. Braun, Karlsruhe, ISBN 3-7650-2028-1
- Malcherek, A. (1999): Hydromechanik der Oberflächengewässer – Version 5.0. Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg
- Marelius, F.; Sinha, S.K. (1998): Experimental Investigation of Flow Past Submerged Vanes. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 5, pp. 542 - 545
- Meckel, H. (1978): Spiralströmungen und Sedimentbewegung in Fluss- und Kanalkrümmungen. Wasserwirtschaft, Jg. 68, Nr. 10, S. 287 - 294
- Mende, M. (2006): Lenkbuhnen: Eine kostengünstige und naturnahe Methode zur Aufwertung von Fließgewässern. Beitrag zum gemeinsamen Institutskolloquium der TU Braunschweig und HS Magdeburg-Stendal (FH) am 16. November 2006 "Kostengünstige Bausteine zur Umsetzung der EU-WRRL", S. 22 - 26
- Mende, M. (2011): Uferumgestaltung und Gewässerentwicklung an der Wiese bei Maulburg – Technischer Bericht Ausführungsprojekt. Auftraggeber: Regierungspräsidium Freiburg, Dienstsitz Bad Säckingen, Abteilung 5, Referat 53.1
- Mende, M. (2012): Instream River Training – Naturnaher Flussbau mit minimalem Materialeinsatz. Korrespondenz Wasserwirtschaft, Jg. 5, Nr. 10, S. 537 - 543
- Mende, M. (2013): Kostengünstige Bausteine zur ökologischen Aufwertung von Fließgewässern. Ingenieurbiologie, Nr. 1, S. 62 - 66

- Mende, M.; Koll, K. (2006): Wissenschaftliche Beratung und Begleitung innovativer Sicherungs- und Strukturmaßnahmen an Gewässern 1. Ordnung (haupts. Wiese in Lörrach). LWI-Bericht Nr. 932, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig
- Mende, M.; Koll, K. (2008): Wissenschaftliche Beratung und Begleitung innovativer Sicherungs- und Strukturmaßnahmen an Gewässern 1. Ordnung (hauptsächlich Wiese in Lörrach) – Teilmaßnahme 2: Monitoring der morphodynamischen Entwicklung. LWI-Bericht Nr. 970, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig
- Mende, M.; Sindelar, C. (2010): Instream River Training - Lenkbuhnen und Pendelrampen. Beitrag zum 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 1.-3. Juli 2010 in Wallgau, Oberbayern, S. 35 – 44
- Meyenburg, I. (2007): Einfluss der Anordnung und Geometrie von Lenkbuhnen auf ihre hydraulische Wirkung. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, 2007 (unveröffentlicht)
- Nakato, T.; Kennedy, J.F.; Bauerly, D. (1990): Pump-Station Intake-Shoaling Control with Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 1, pp. 119 - 129
- Nakato, T.; Ogden, F.L. (1998): Sediment Control at Water Intakes along Sand-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 6, pp. 589 - 596
- Newton, B.; Pringle, C.; Bjorkland, R. (1998): Stream Visual Assessment Protocol, National Water and Climate Center Technical Note 99-1. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service
- Nikora, V. I.; Goring, D. G. (1998): Adv measurements of turbulence: Can we improve their interpretation. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 6, pp. 630 - 634
- Nortek (2000): Nortek Velocimeter. Operational and Software Manual
- NRCS (2000): Design of Stream Barbs. Technical Notes, Engineering-No. 23, U.S. Department of Agriculture, Portland, Oregon
- NRCS (2005): Design of Stream Barbs. Version 2.0, Technical Note 23, U.S. Department of Agriculture, Portland, Oregon
- Odgaard, A.J. (1989): River-meander model - I: Development, II. Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 11, pp. 1433 - 1464
- Odgaard, A.J. (2009): River Training and Sediment Management with Submerged Vanes. ASCE, ISBN 978-0-7844-0981-7
- Odgaard, A.J.; Kennedy, J.F. (1983): River-Bend Bank Protection by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 8, pp. 1161 - 1173
- Odgaard & Lee (1984): Submerged Vanes for Flow Control and Bank Protection in Streams. IIHR Report No. 279, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa / USA
- Odgaard, A.J.; Mosconi, C.E. (1987): Streambank Protection by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 4, pp. 520 - 536
- Odgaard, J.; Spoljaric, A. (1986a): Lift and drag on small-aspect ratio foils. Proceeding of the ASCE Specialty Conference on Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics and Hydraulics, University of Minnesota, Minneapolis, June 3 - 6, pp. 193 - 199
- Odgaard, J.; Spoljaric, A. (1986b): Sediment Control by Submerged Vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 12, pp. 1164 - 1181
- Odgaard, A.J.; Wang, Y. (1990): Sediment Control in Bridge Waterways. IIHR Report No. 336, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa / USA
- Odgaard, A.J.; Wang, Y. (1991): Sediment Management with Submerged Vanes - I: Theory, II. Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 267 - 302



- Oplatka, M. (1998): Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern. Mitteilung der VAW, ETH Zürich, Heft 156
- Österreichisches Patentamt (1933): Patentschrift Nr. 134543 – Viktor Schauburger in Wien – Wasserführung in Rohren und Gerinnen. Angemeldet am 12. August 1931, Beginn der Patentdauer am 15. April 1933, Wien: Österreichische Staatsdruckerei
- Pinter, K.; Unfer, G.; Wiesner, C. (2009): Fischbestandserhebung der Mur im Bereich St. Michael - Studie im Auftrag der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19b. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, Wien
- Prandtl, L.; Oswatitsch, K.; Wieghardt, K. (1993): Führer durch die Strömungslehre. 9. verbesserte und erweiterte Auflage, Vieweg-Verlag Braunschweig, ISBN 3-528-28209-6
- Requena, P. (2008): Seitenerosion in kiesführenden Flüssen. Mitteilung der VAW, ETH Zürich, Heft 210
- Rosgen, D. L., (2001): The cross-vane, W-weir and J-hook vane structures - their description, design and application for stream stabilization and river restoration. ASCE Wetland and Stream Restoration Conference 2001, Reno, NV, August
- Rosgen, D. (2006): Cross-Vane, W-Weir, and J-Hook Vane Structures (Updated 2006) - Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration. Wildland Hydrology, Ft. Collins, Colorado 80524
- Rozovskii, I.L. (1957): Flow of water in bends of open channels. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering, Kiev
- Sabersky, R. H.; Acosta, A. J. (1964): Fluid flow. MacMillan Publishing Co., New York
- Scherle, J. (1999): Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen – Grundlagen, Leitbilder, Planung. Mitteilung des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 199
- Scheuerlein, H. (1984): Die Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen. Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, ISBN 3-433-00985-6
- Schröder, W.; Römisch, K. (2001): Gewässerregulierung, Binnenverkehrswasserbau. Werner Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-804-13073-9
- Schütz, W. (2009): Biogene maschinelle Ufersicherung (BMU). Ingenieurbiologie, Nr. 3, S. 11 - 23
- Sindelar, C.; Knoblauch, H.; Badura, H.; Grober, O. (2007): Monitoring of a bend training structure at the River Mur. Proc. of the Conference Hydraulic Measurements and Experimental Methods, Lake Placid / USA. Book of Extended Abstracts, pp. 118 - 123
- Sindelar, C.; Mende, M. (2009): Lenkbuhnen zur Strukturierung und Stabilisierung von Fließgewässern. Wasserwirtschaft, Nr. 1-2, S. 70 - 75
- Stowasser, A. (2011): Potenziale und Optimierungsmöglichkeiten bei der Auswahl und Anwendung ingenieurbiologischer Bauweisen im Wasserbau. Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover, Schriftenreihe Umwelt und Raum, Bd. 5, ISBN 978-3-86955-795-3
- SonTek (2001): Acoustic Doppler Velocimeter Principles of Operation (September 2001)
- SonTek (2007): 10-MHz ADV Expanded Description. Download am 24.07.07 unter <http://www.sontek.com/product/adv/advxdsc.htm>
- Tan, S.-K.; Yu, G.; Lim, S.-Y.; Ong, M.-C. (2005): Flow Structure and Sediment Motion around Submerged Vanes in Open Channel. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 131, No. 3, pp. 132 - 136
- Tent, L. (2011): Restoration of Habitat as Essential Factor for Improved Fauna Populations – Long Term Experience on North German Lowland Brooks. Vortrag im Rahmen der interna-

tionalen Konferenz "Restoration of Streams with special emphasis on the houting and the Houting Projekt" in Tønder, Dänemark, 3.-5. Oktober 2011

Thornton, C. I.; Heintz, M. L.; Abt, S. R.; Baird, D. C.; Padilla, R. S. (2005): Effects of Bendway Weir Characteristics on Resulting Flow Conditions. Proceedings of the World Water & Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, 15. - 19.5.2005

Truckenbrodt, E. (2008): Fluidmechanik Band 2 – Elementare Strömungsvorgänge dichte- veränderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen. 4. Auflage in veränderter Ausstattung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-79023-5

van Zwol, J. A. (2004): Design aspects of submerged vanes. M. Sc. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Hydraulic Engineering

Voisin, A.; Townsend, R.D. (2002): Model testing of submerged vanes in strongly curved narrow channel bends. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 37 - 49

Voulgaris, G. ; Trowbridge, J. H. (1998): Evaluation of the acoustic doppler velocimeter (adv) for turbulence measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, No 15, pp. 272 - 289

Wahrheit-Lensing, A.; Richter, A. (1996): Einsatz von Leitelementen als Gegenmaßnahme für Geschiebeeinzug bei einer seitlichen Flusswasserentnahme. Wasserwirtschaft, Jg. 86, S. 496 - 500

Wang, Y. (1991): Sediment Control with Submerged Vanes. Thesis presented to the University of Iowa, at Iowa City, Iowa, in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

Wang, Y.; Odgaard, A.J. (1993): Flow control with vorticity. Journal of Hydraulic Research, Vol. 31, No. 4, pp. 549 - 562

Wang, Y.; Odgaard, A.J.; Melville, W.; Jain, S.C. (1996): Sediment Control at Water Intakes. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 6, pp. 353 - 356

Weber, M.; Roth, M.; Herrmann, F. (2000): Der Einfluss von Buhnen auf die Hydraulik, die Flussmorphologie und den Geschiebetransport. Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, Jg. 92, Nr. 5 / 6, S. 125 - 130

Werdenberg, N.; Meile, T.; Steiner, R. (2012a): Erfahrung mit Lenkbuhnen bei Hochwasserschutz und Renaturierung - Instream River Training am Voralpenfluss Taverna. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 12.-15. September 2012 in Graz, Steiermark, S. 533 – 540

Werdenberg, N.; Steiner, R.; Meile, T. (2012b): Strömungslenkung an der unteren Taverna - Neue Wege im naturnahen Flussbau. Aqua & Gas, Nr. 4, S. 12 – 17

Whitman, H.; Hoopes, J.; Poggi, D.; Fitzpatrick, F.; Walz, K. (2001): Demonstration and Field Evaluation of Streambank Stabilization with Submerged Vanes. Proceedings of the Wetlands Engineering and River Restoration Conference, Reno, Nev., pp. 1 - 12

Winkel, R. (1947): Die Grundlagen der Flussregelung. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

Yossef, M.F.M. (2004): The effect of the submergence level on the resistance of groynes – an experimental investigation. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE-2004), May 30 – June 2, Australia, pp. 1 – 9

Yossef, M.F.M. (2005): Morphodynamics of rivers with groynes. Thesis, Delft University Press, ISBN 90-407-2607-8

Zeller, J. (1967): Flußmorphologische Studie zum Mäanderproblem. Geographica Helvetica, Nr. 22, S. 57 - 95

## **10    Anhang**

<b>Anhang 1: Untersuchte Lenkbuhnenanordnungen .....</b>	<b>125</b>
<b>Anhang 2: Standardmessraster bei verschiedenen Fließtiefen.....</b>	<b>128</b>
<b>Anhang 3: Änderung der Quergeschwindigkeit mit dem Fließweg.....</b>	<b>129</b>
<b>Anhang 4: Visualisierte Oberflächenströmung .....</b>	<b>130</b>
<b>Anhang 5: Relative Quergeschwindigkeit zu relativem Abstand .....</b>	<b>131</b>
<b>Anhang 6: Änderung der tiefengemittelten Geschwindigkeit zu relativem Abstand...</b>	<b>133</b>
<b>Anhang 7: Anstieg der Fliesstiefe zu relativem Abstand .....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang 8: Widerstandsbeiwert der Lenkbuhnen zu relativem Abstand.....</b>	<b>138</b>
<b>Anhang 9: Beispiel für die Bemessung der Steingrösse nach LfU (2000).....</b>	<b>139</b>

## ANHANG 1: UNTERSUCHTE LENKBUHNENANORDNUNGEN

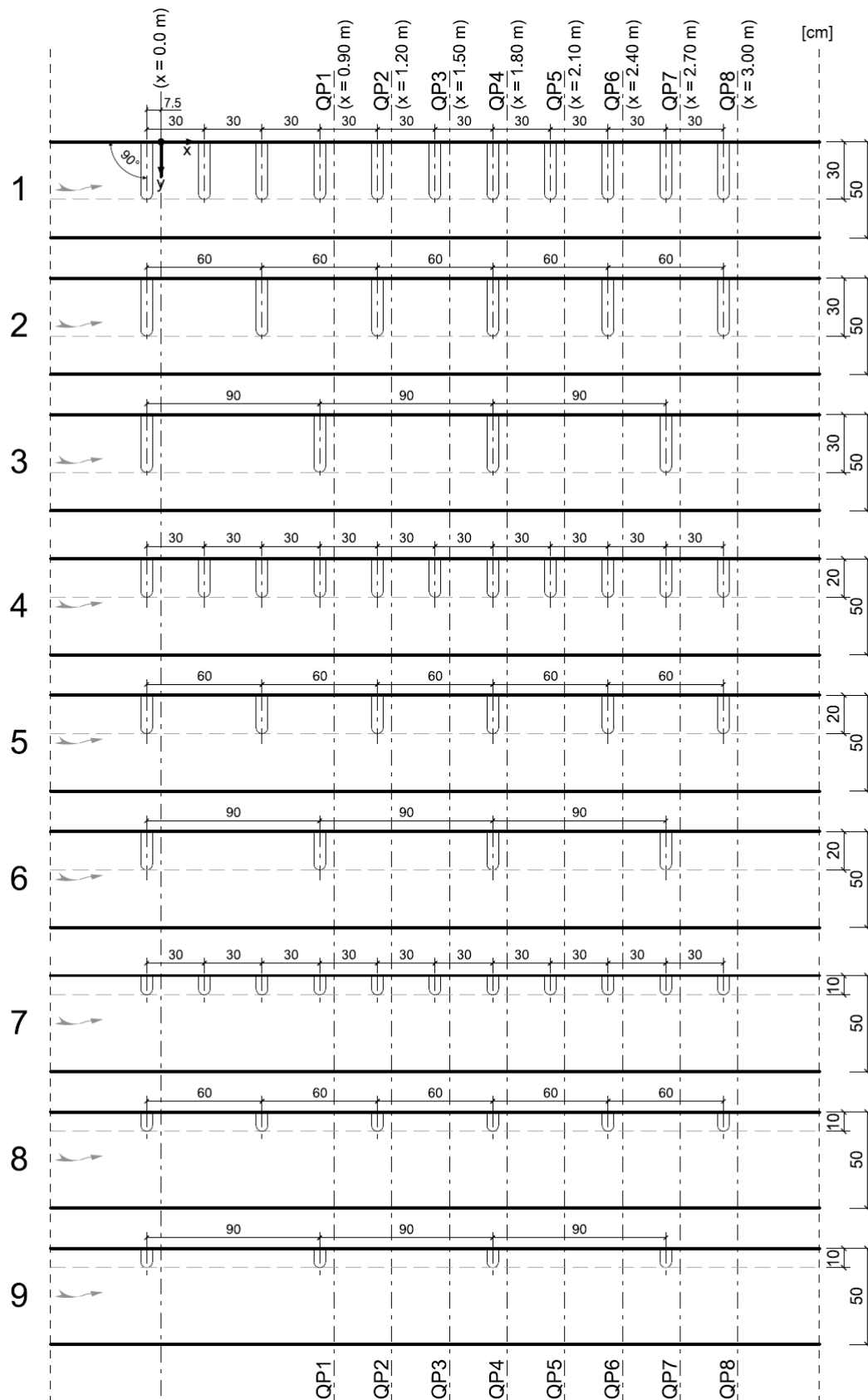


Abb. A1: Untersuchte Lenkbuhnenanordnungen bei einem Inklinationenwinkel  $\alpha = 90^\circ$  mit Lage der Messprofile

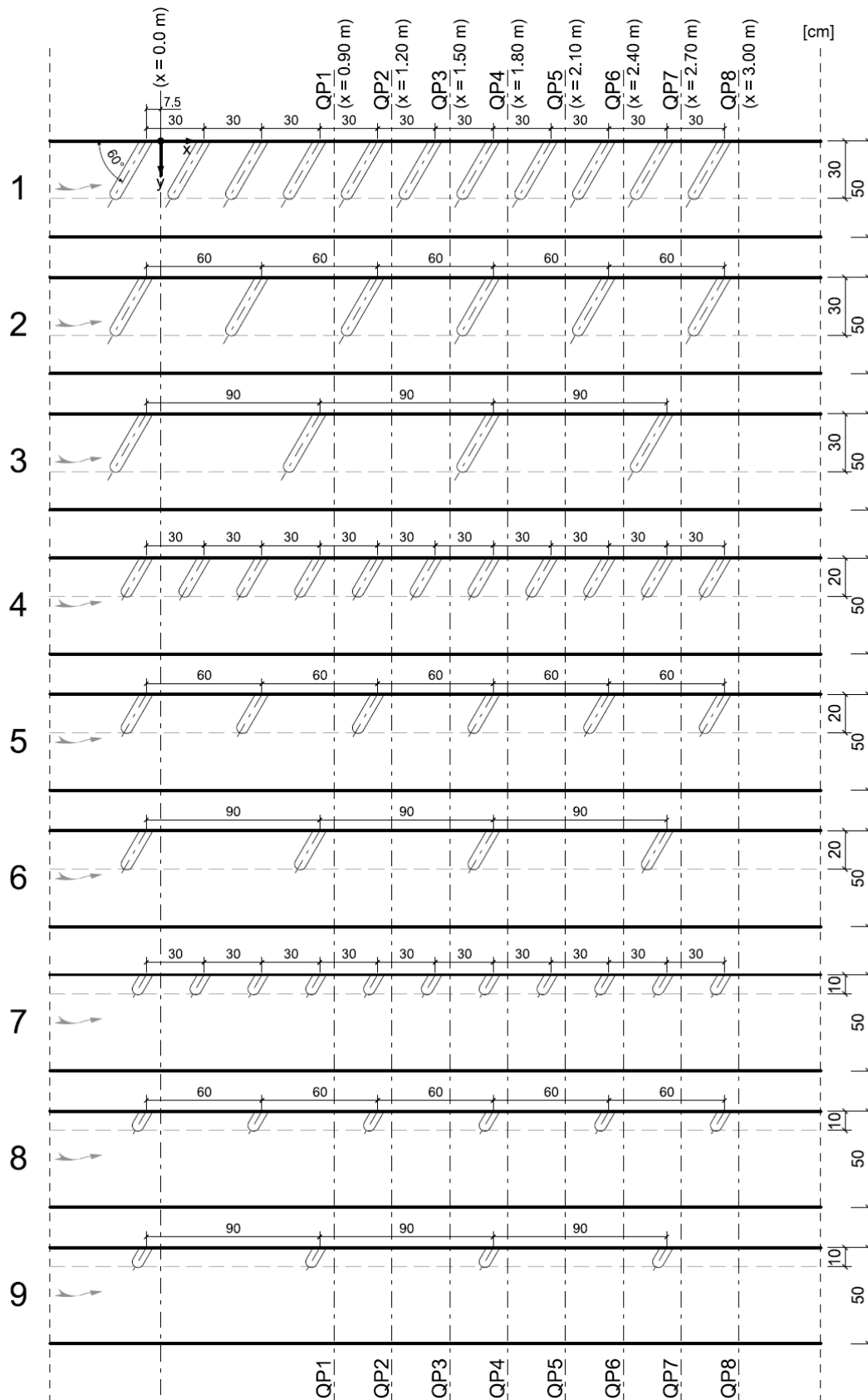


Abb. A2: Untersuchte Lenkbuhnenanordnungen bei einem Inklinationswinkel  $\alpha = 60^\circ$  mit Lage der Messprofile

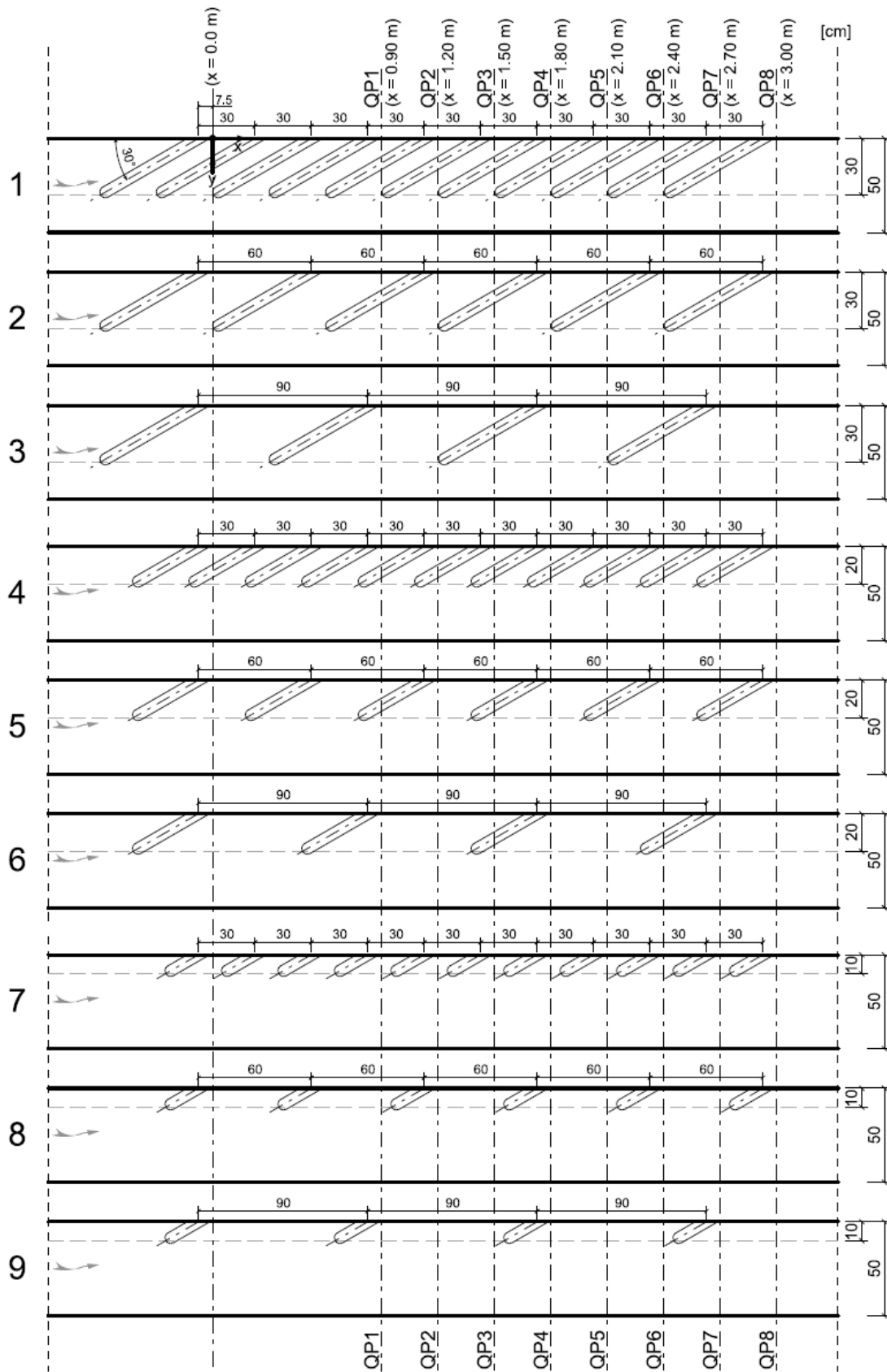


Abb. A3: Untersuchte Lenkbuhnenanordnungen bei einem Inklinationenwinkel  $\alpha = 30^\circ$  mit Lage der Messprofile

## ANHANG 2: STANDARDMESSRASTER BEI VERSCHIEDENEN FLIESSTIEFEN

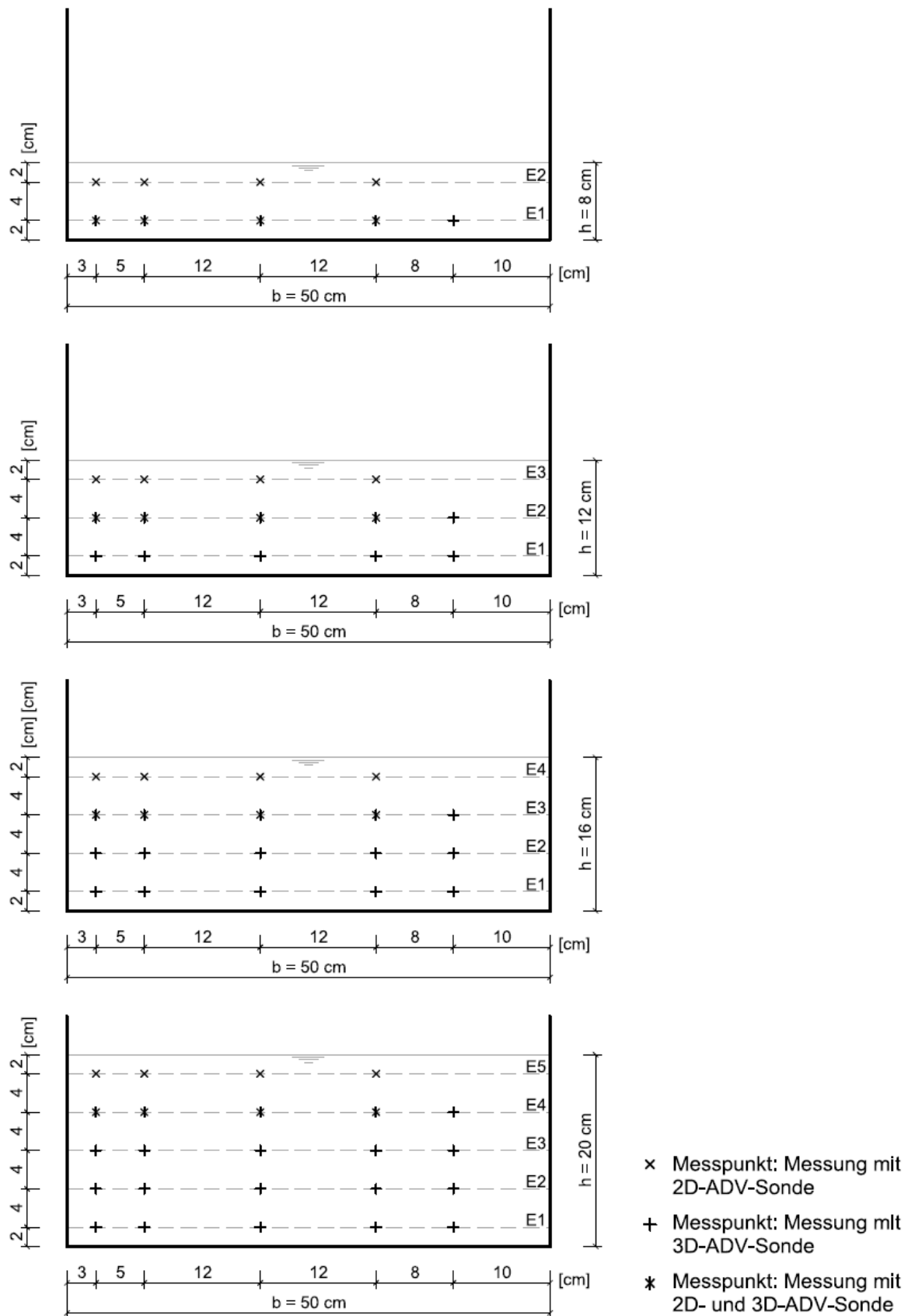
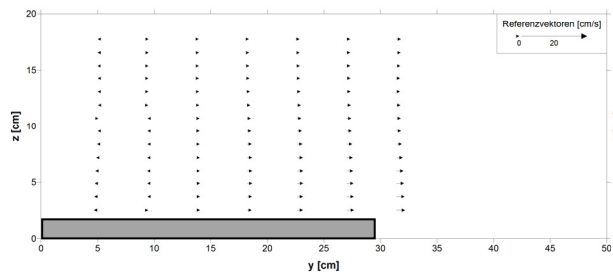


Abb. A4: Querprofile mit Standardmessraster

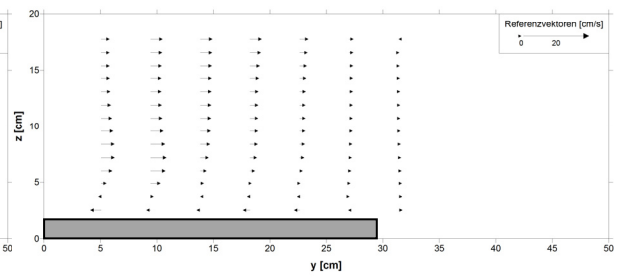


### ANHANG 3: ÄNDERUNG DER QUERGESCHWINDIGKEIT MIT DEM FLIESSWEG

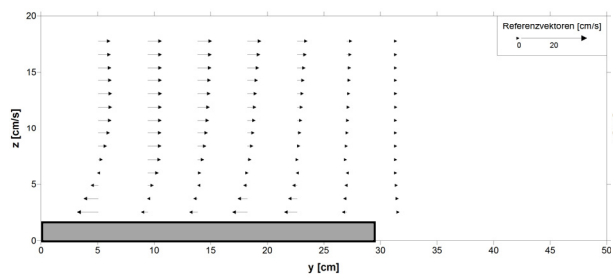
(a)  $x = -30$  cm



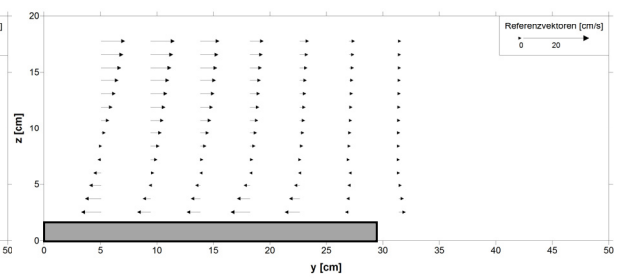
(b)  $x = 0$  cm



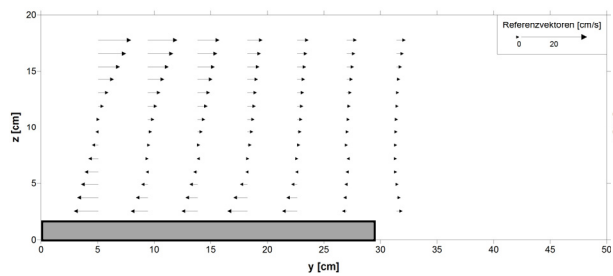
(c)  $x = 30$  cm



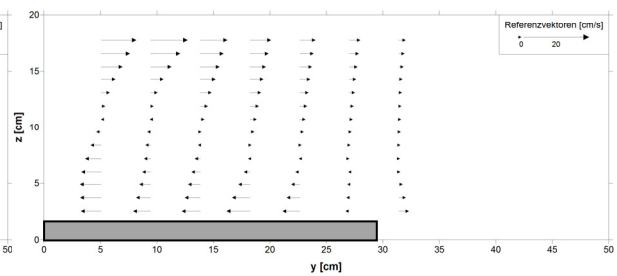
(d)  $x = 60$  cm



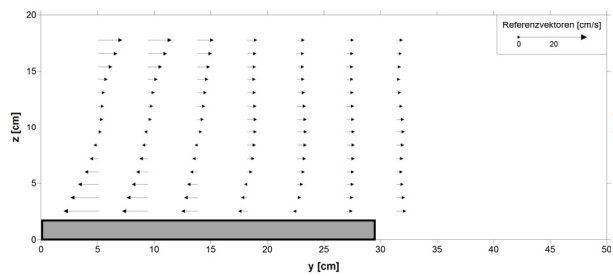
(e)  $x = 90$  cm



(f)  $x = 120$  cm



(g)  $x = 150$  cm



(h)  $x = 210$  cm

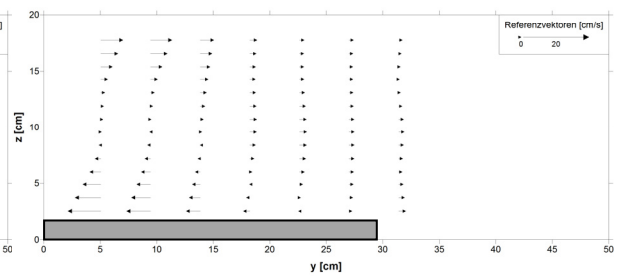


Abb. A5: Änderung der Quergeschwindigkeitsverteilung  $v$  mit dem Fließweg (Beispiel:  $H = 1/10$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm,  $\alpha = 60^\circ$ )

#### ANHANG 4: VISUALISIERTE OBERFLÄCHENSTRÖMUNG

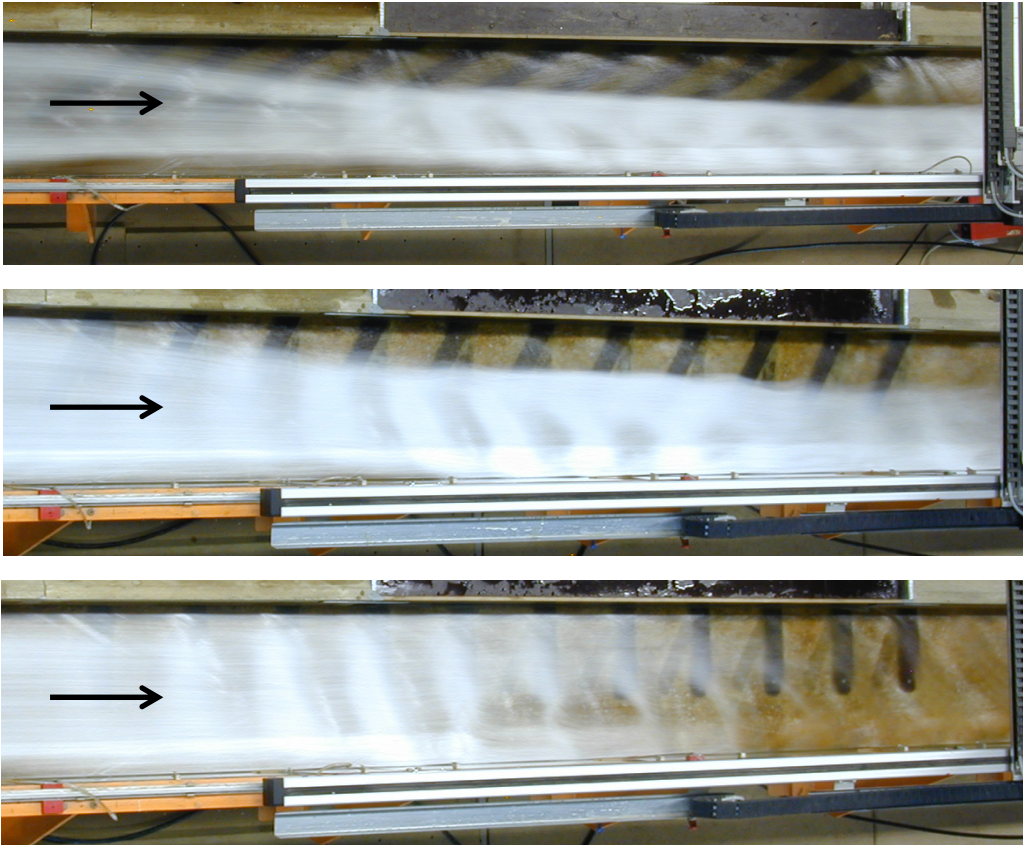


Abb. A6: visualisierte Oberflächenströmung bei  $H = 1/6$ ,  $a_x = l_p = 30$  cm;  $\alpha = 30^\circ$  (oben),  $60^\circ$  (Mitte),  $90^\circ$  (unten)

## ANHANG 5: RELATIVE QUERGESCHWINDIGKEIT ZU RELATIVEM ABSTAND

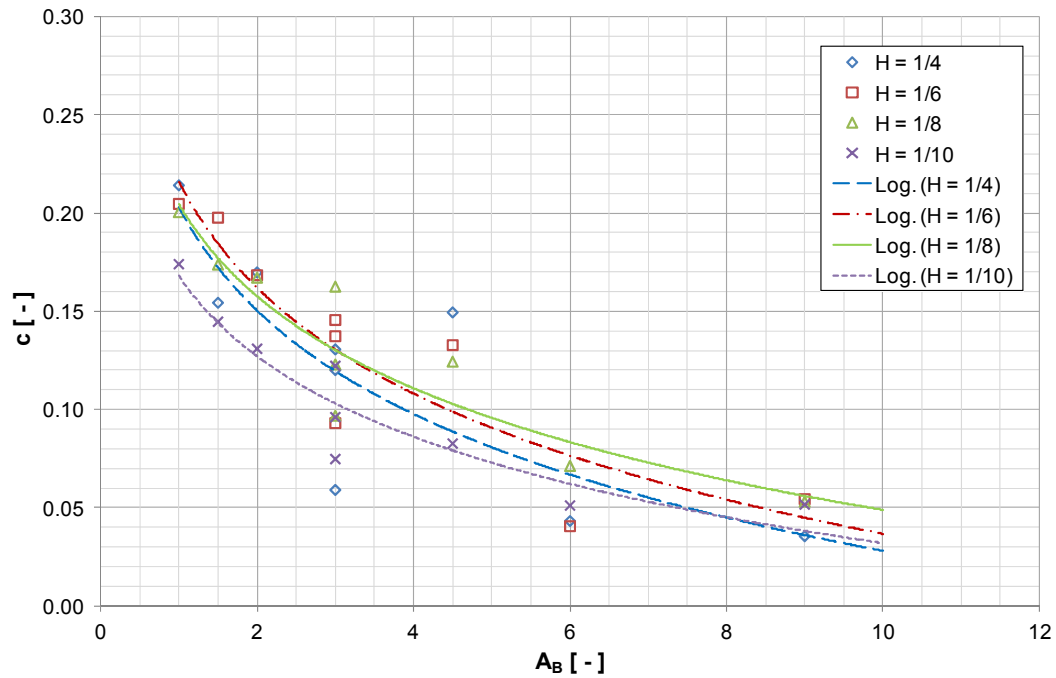


Abb. A7: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$  für  $\alpha = 30^\circ$  und  $y = 3$  cm

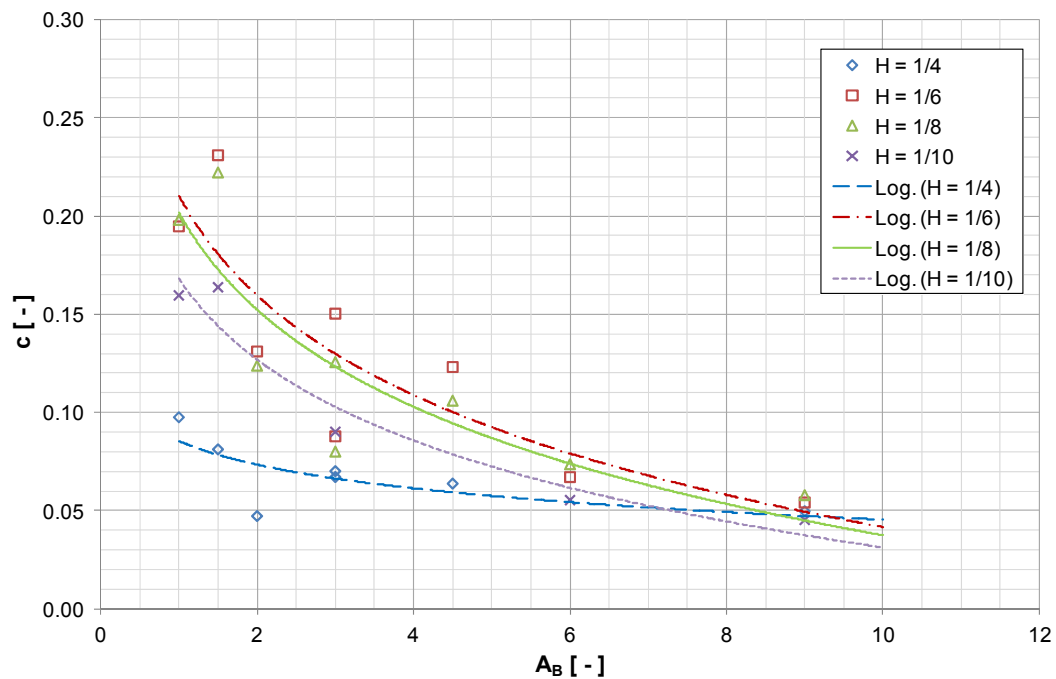


Abb. A8: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$  für  $\alpha = 60^\circ$  und  $y = 3$  cm

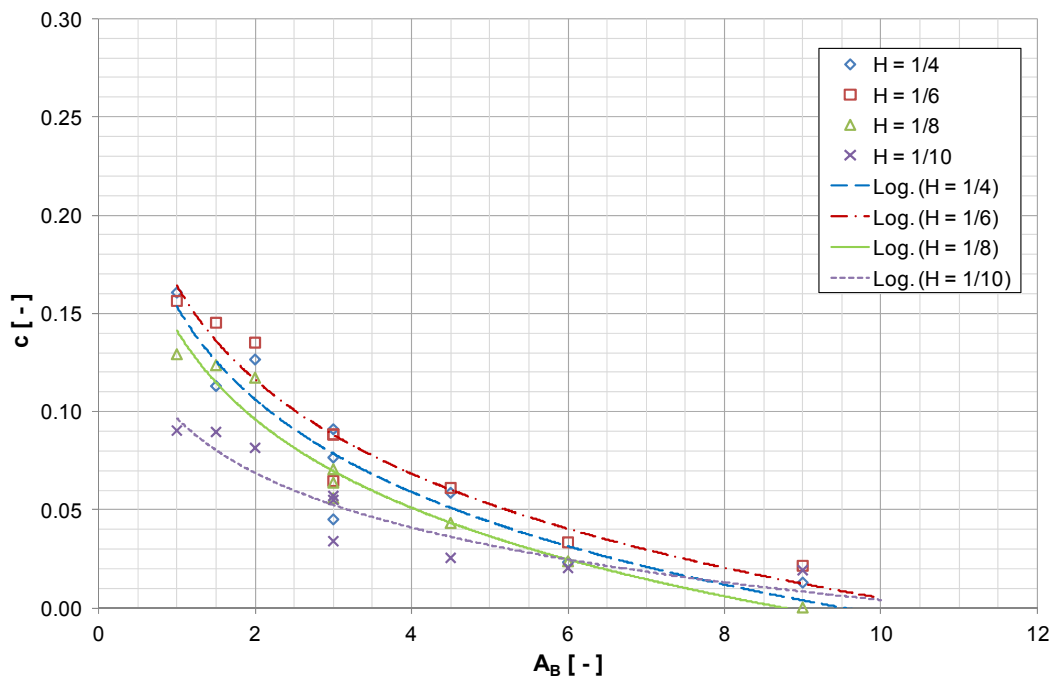


Abb. A9: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$  für  $\alpha = 30^\circ$  und  $y = 20$  cm

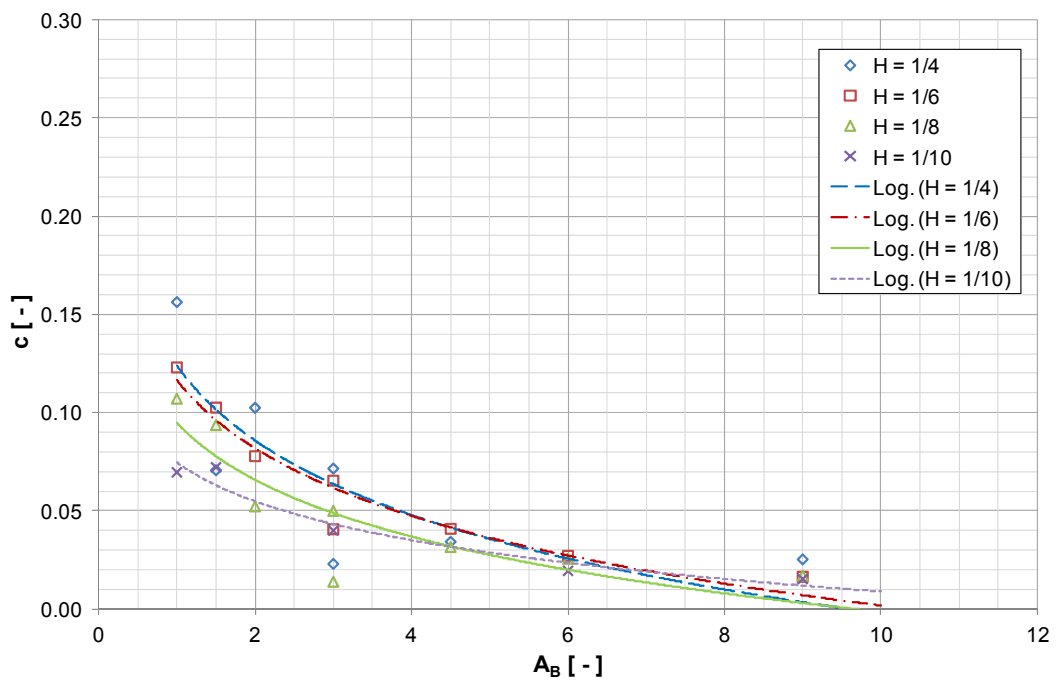


Abb. A10: Abhängigkeit zwischen der relativen Quergeschwindigkeit  $c$  und dem relativen Abstand  $A_B$  für  $\alpha = 60^\circ$  und  $y = 20$  cm

## ANHANG 6: ÄNDERUNG DER TIEFENGEMITTELTEN GESCHWINDIGKEIT ZU RELATIVEM ABSTAND

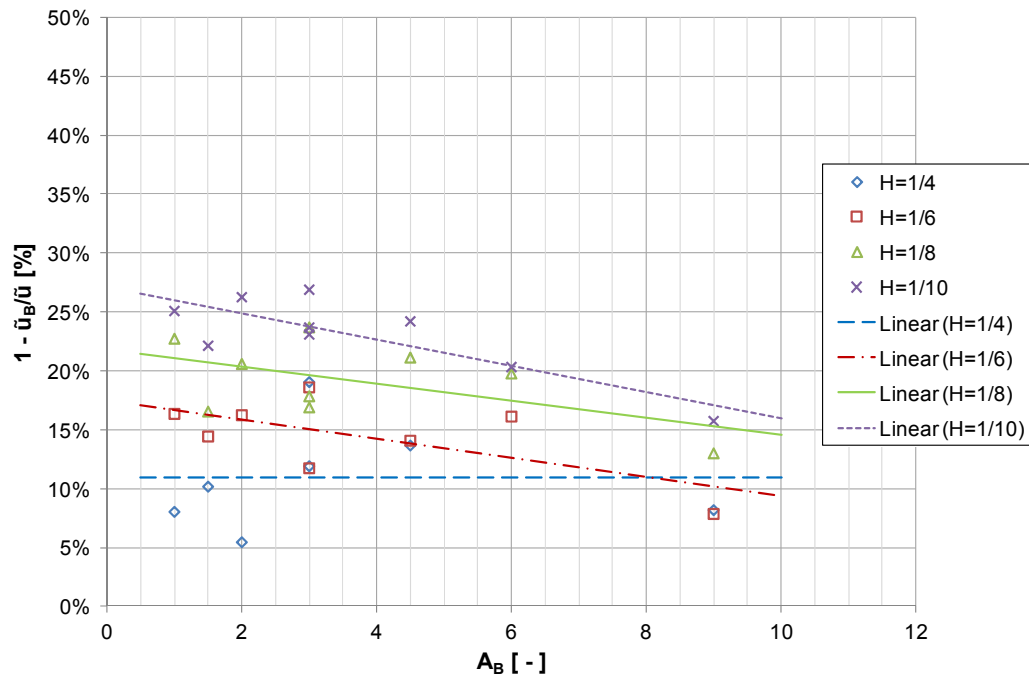


Abb. A11: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 3$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 30^\circ$

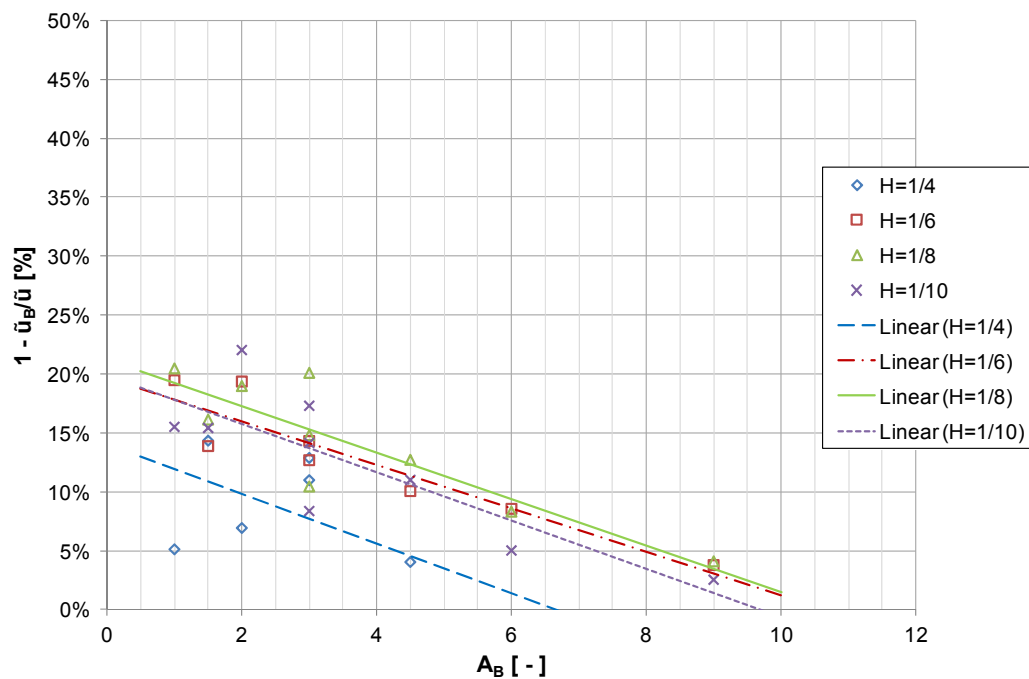


Abb. A12: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 8$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 30^\circ$

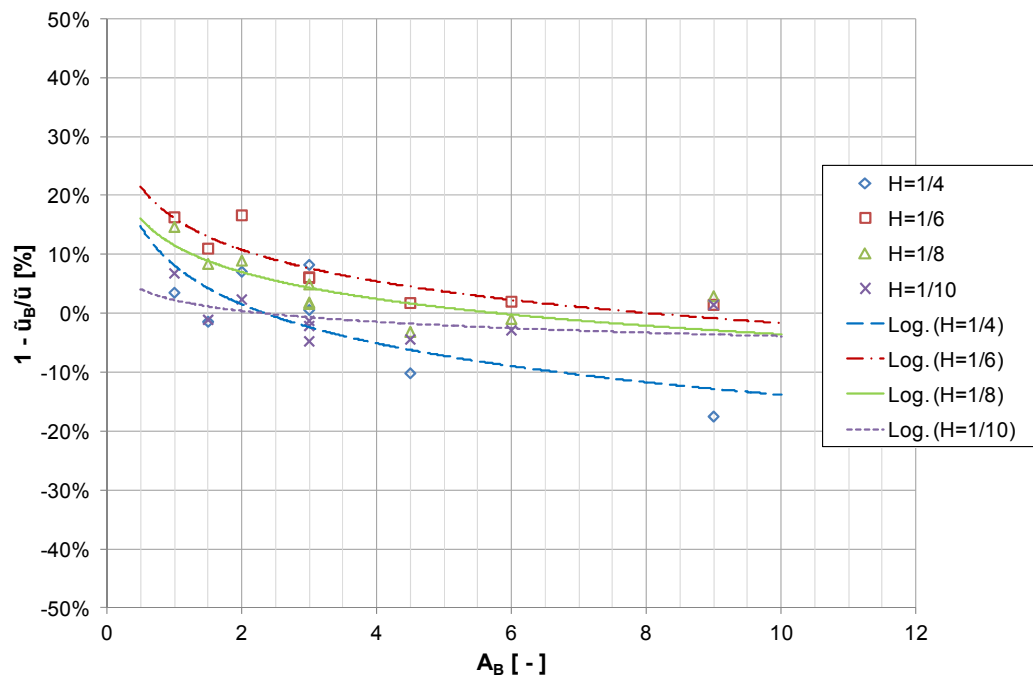


Abb. A13: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 20$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationswinkel von  $\alpha = 30^\circ$

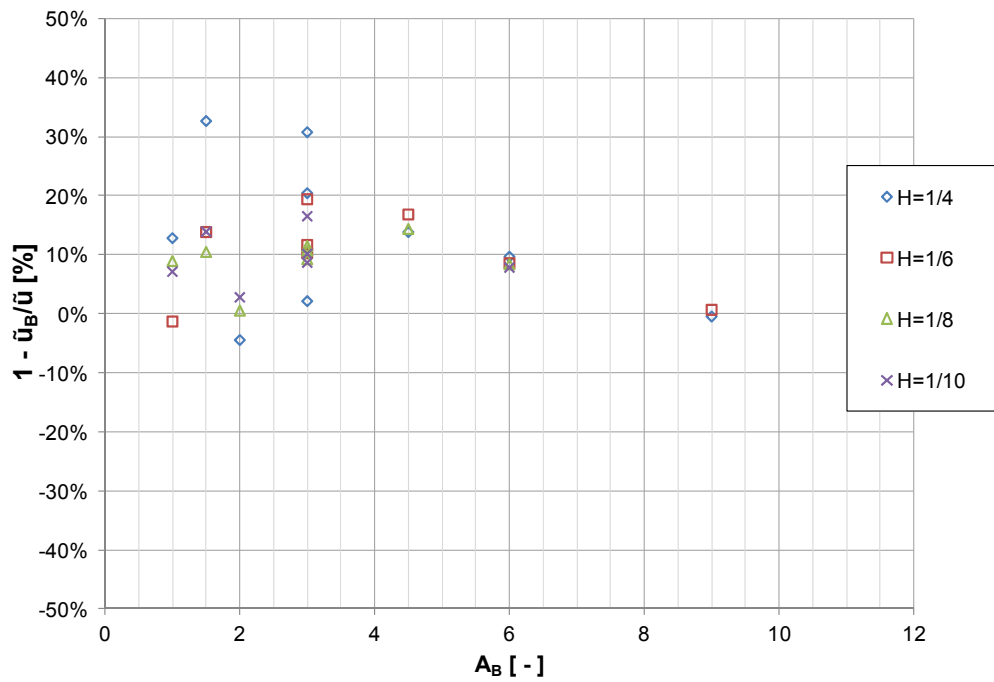


Abb. A14: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 3$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationswinkel von  $\alpha = 90^\circ$

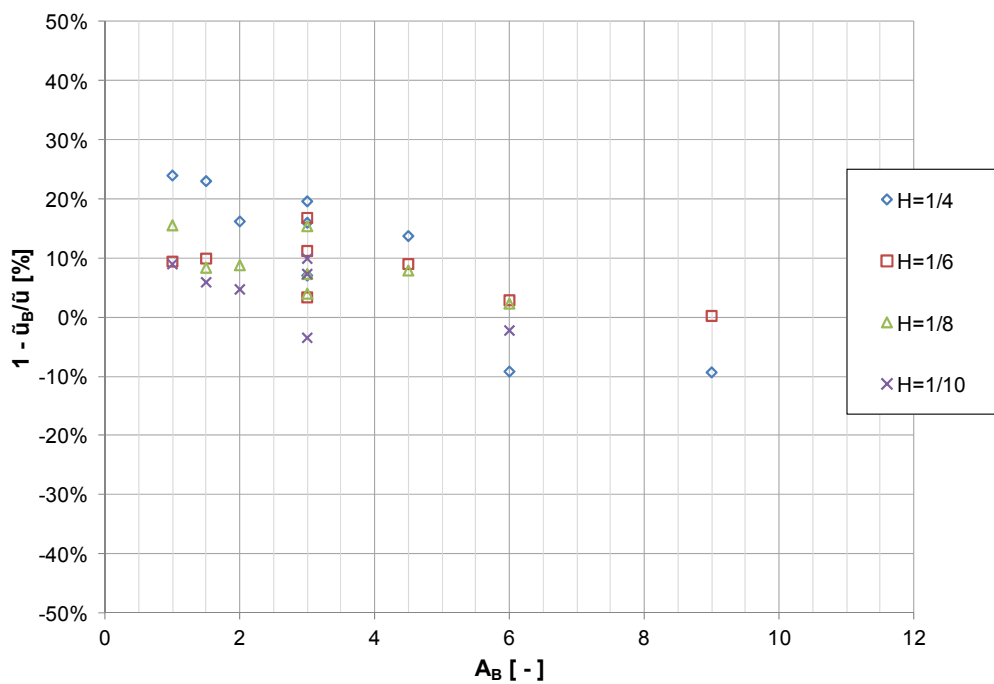


Abb. A15: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 8$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationswinkel von  $\alpha = 90^\circ$



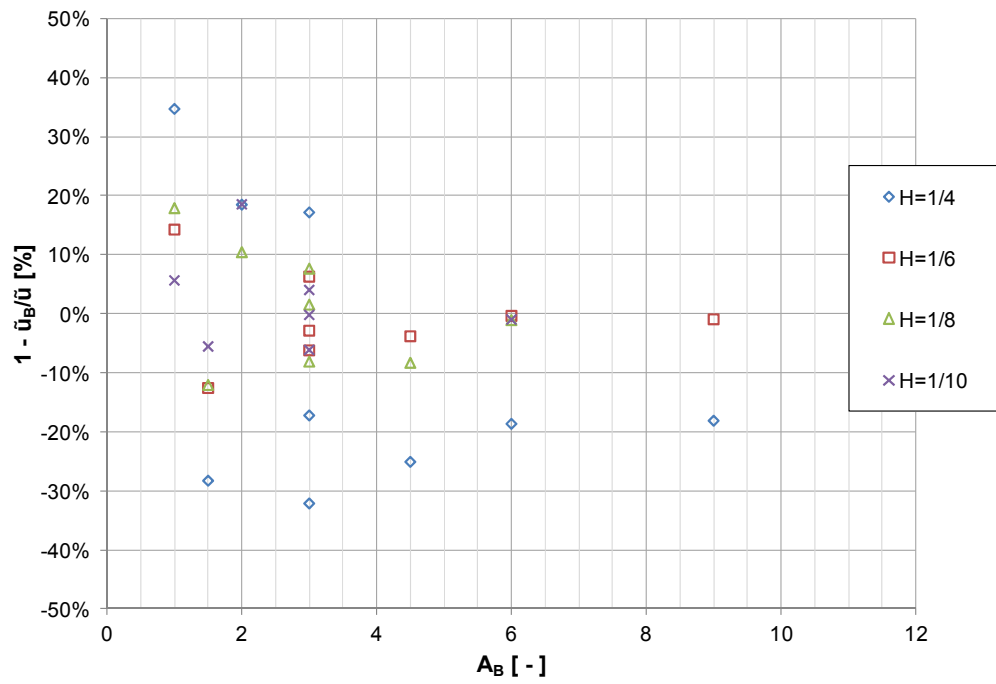


Abb. A16: Änderung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  bei  $y = 20$  cm in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 90^\circ$

## ANHANG 7: ANSTIEG DER FLIESSTIEFE ZU RELATIVEM ABSTAND

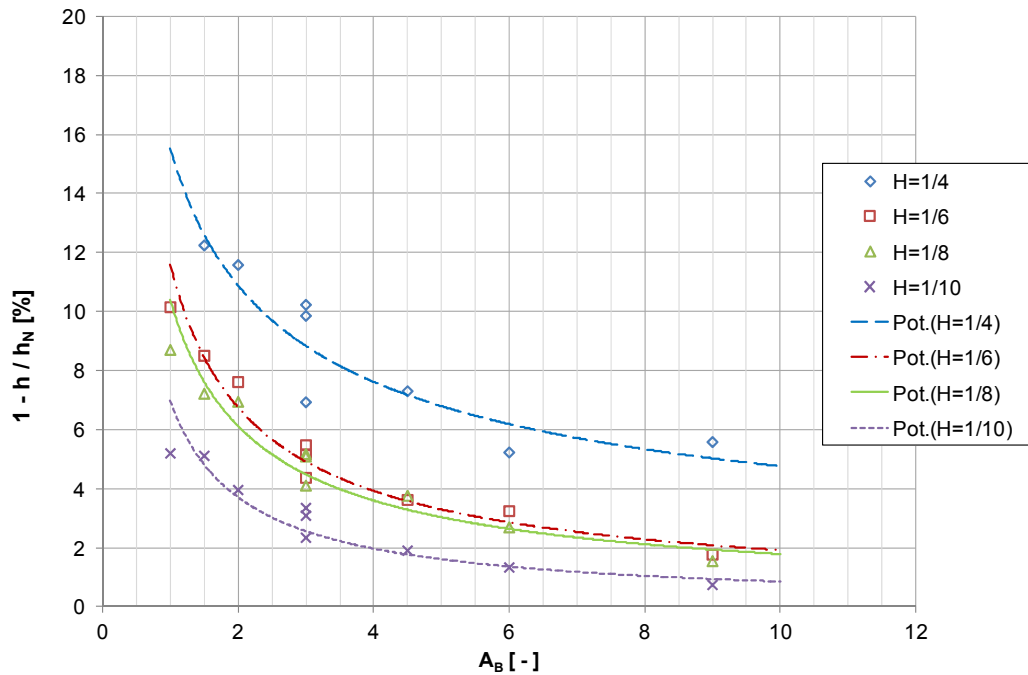


Abb. A17: Verhältnis von relativem Abstand  $A_B$  zum Anstieg der Fließtiefe bei einem Inklinationwinkel  $\alpha = 30^\circ$

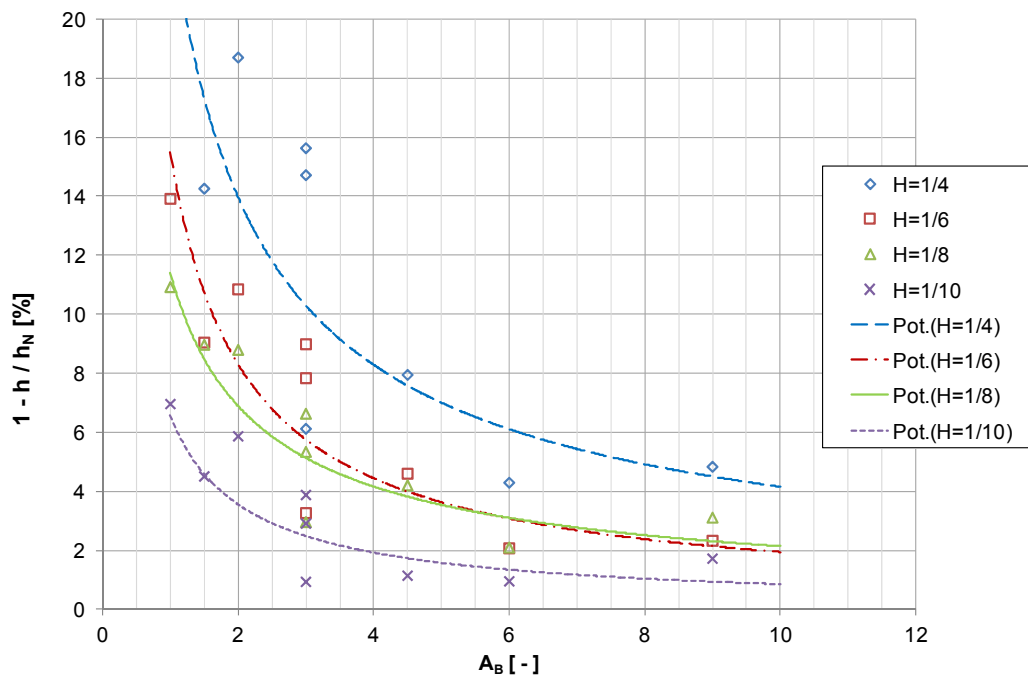


Abb. A18: Verhältnis von relativem Abstand  $A_B$  zum Anstieg der Fließtiefe bei einem Inklinationwinkel  $\alpha = 90^\circ$

## ANHANG 8: WIDERSTANDSBEIWERTE DER LENKBUHNEN ZU RELATIVEM ABSTAND

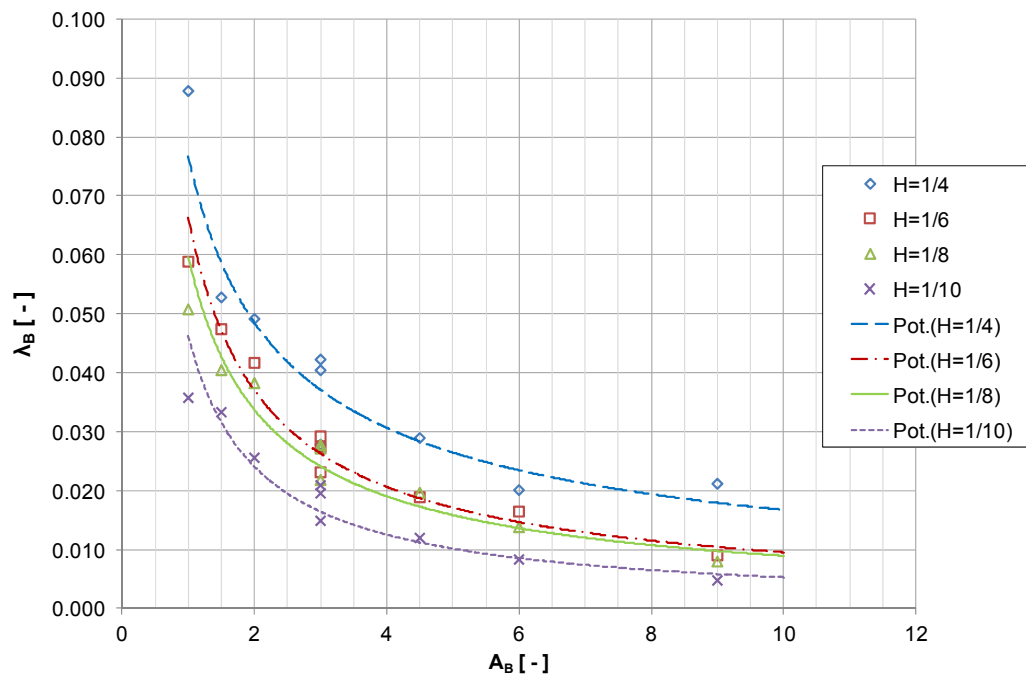


Abb. A19: Änderung des Widerstandsbeiwerts  $\lambda_B$  der Lenkbuhnen in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 30^\circ$

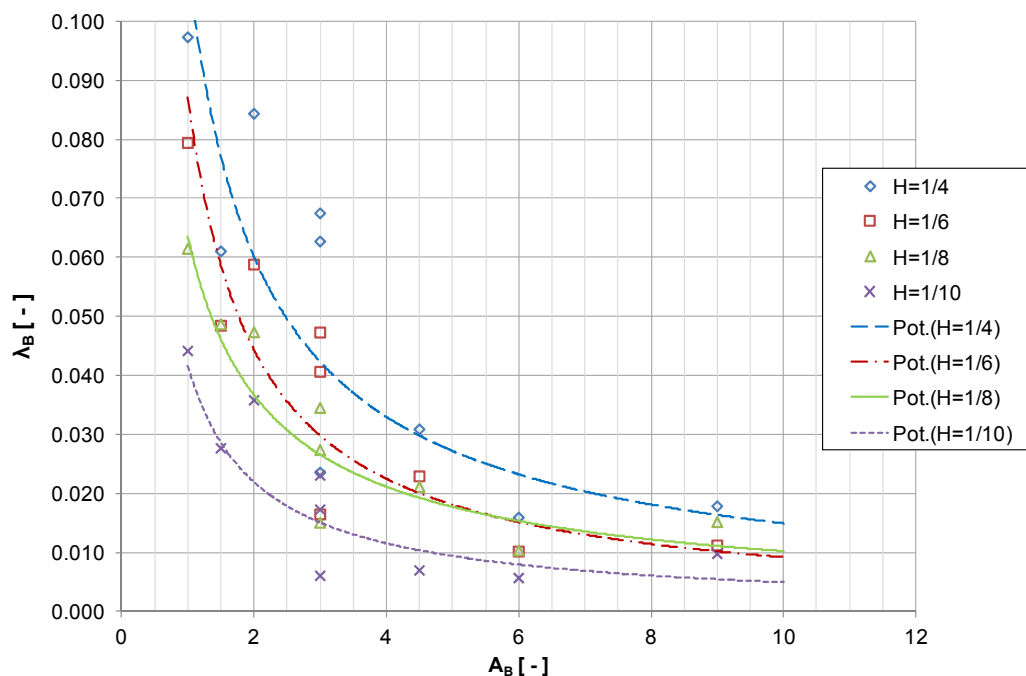


Abb. A20: Änderung des Widerstandsbeiwerts  $\lambda_B$  der Lenkbuhnen in Abhängigkeit vom relativen Abstand  $A_B$  bei einem Inklinationwinkel von  $\alpha = 90^\circ$

## ANHANG 9: BEISPIEL FÜR DIE BEMESSUNGS DER STEINGRÖSSE NACH LFU (2000)

An einem Fluss sollen Lenkbuhnen gebaut werden. Gesucht ist die notwendige Blocksteingröße.

Eingangsdaten:

Anströmgeschwindigkeit bei $Q_b$ :	$u_b = 4.5 \text{ m/s}$
Dichte des Steinmaterials:	$\rho_s = 2'650 \text{ kg/m}^3$
Innerer Reibungswinkel des Riegels	$\beta = 35^\circ$
Neigungswinkel der Sohle:	$\alpha_{So} \approx 0^\circ$

Bei dem Bemessungsverfahren der LfU (2000) wird der notwendige Steindurchmesser iterativ bestimmt und muss daher zunächst geschätzt werden:

gew. Steindurchmesser  $d_s = 1.35 \text{ m}$

$$A_s = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_s^2 = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot 1.35^2 = 0.72 \text{ m}^2$$

mit:

$A_s$	=	angeströmte Steinfläche [ $\text{m}^2$ ]
$d_s$	=	äquivalenter Steindurchmesser [m]

$$G = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_s^3 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 1.35^3 \cdot (2650 - 1000) \cdot 9.81 = 20842 \text{ N} = 20.8 \text{ kN}$$

mit:

$G$	=	Steingewichtskraft unter Auftrieb [N]
$\rho_s$	=	Dichte des Steinmaterials [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\rho$	=	Dichte des Wassers [ $\text{kg/m}^3$ ]
$g$	=	Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

$$P = \rho \cdot A_S \cdot u_b^2 = 1000 \cdot 0.72 \cdot 4.6^2 = 14486 \text{ N} = 14.5 \text{ kN}$$

mit:

$P$  = Strömungskraft [N]

$\rho$  = Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

$$G_P = G \cdot \sin \alpha_{S_0} = 20842 \cdot 0 = 0$$

mit:

$G_P$  = in Fließrichtung geneigte Komponente der Gewichtskraft  $G$  [N]

$$R = G \cdot \tan \beta \cdot \cos \alpha_{S_0} = 20842 \cdot \tan 35^\circ \cdot \cos 0^\circ = 14594 \text{ N} = 14.6 \text{ kN}$$

mit:

$R$  = Haftreibungskraft [N]

$\beta$  = Innerer Reibungswinkel des Riegels [°] ( $\approx 35^\circ$ )

$P+G_P$  muss kleiner  $R$  sein:

$P+G_P = 14.5 \text{ kN} < R = 14.6 \text{ kN}$  Bedingung erfüllt! Mindeststeingröße  $d_S=1.35 \text{ m}$  o.k.!

In dem Verfahren wird von kugelförmigen Steinen ausgegangen. Das Volumen des Steins beträgt daher  $1.3 \text{ m}^3$ , die Steinmasse  $3.5 \text{ t}$ .